

Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 4 (48). С. 79–89
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2023; (4-48): 79–89

Научная статья

УДК 631.372:504.062.2:303.732.4
Код ВАК 4.3.1

EDN: MHAIOK

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ ГЛУБОКОГО РЫХЛЕНИЯ ПОЧВЫ

Камиль Абдулхакович Хафизов¹, Рамиль Наилович Хафизов², Азат Ахиарович Нурмиев³✉,
Ильгиз Гакифович Галиев⁴, Екатерина Игоревна Байгильдеева⁵

^{1, 2, 3, 4} Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

⁵ Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

¹ Fts-kgau@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9098-0692>

² ramilajz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0739-0817>

³ azat-nurmiev@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3514-7478>

⁴ drGali@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0595-1898>

⁵ Baigildeeva_e_i@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4611-4412>

Аннотация. Цель исследований – выявление путей снижения интегрального выброса диоксида углерода в атмосферу за счет оптимизации параметров техники и режимов её работы. Проведены многочисленные вычислительные эксперименты с использованием математической модели агрегатов на глубоком рыхлении почвы. Критерий эффективности их эксплуатации – минимальный интегральный выброс CO₂ агрегатом за весь жизненный цикл. Выявлены оптимальные параметры агрегата глубокорыхлителя для заданных условий их работы: оптимальный вес – 150 кН, мощность двигателя – 477 л.с., ширина захвата – 7 м, рабочая скорость – 9,5 км/ч. При таких значениях основных параметров трактора и агрегата обеспечивается минимальный выброс в атмосферу CO₂ – 423 кг/га. Суммарные энергетические затраты составят 3247 МДж/га, производительность за 1 час времени смены – 3,77 га/ч, погектарный расход топлива – 13,8 кг/га, условный тяговый коэффициент полезного действия трактора (КПД) – 0,72. Изменение веса трактора в сторону увеличения или уменьшения приведет к росту удельных суммарных энергетических затрат и количества CO₂, выбрасываемого в атмосферу. Определено влияние некоторых факторов (объема работы, планируемой урожайности, удельного сопротивления глубокорыхлителя и др.) на величину интегрального выброса CO₂ при эксплуатации агрегата. Выявлена возможность снижения интегрального выброса диоксида углерода в пределах от 100 до 2000 кг/га, в зависимости от условий работы агрегатов и используемой техники. Установлено, что снижение удельного сопротивления глубокорыхлителя с 16 кН/м до 8 кН/м приводит к снижению выброса CO₂ с 565 до 325 кг/га, что составит в среднем 30 кг/га на 1 кН/м.

Ключевые слова: экология, безопасность, машинно-тракторный агрегат, парниковые газы, оптимизация параметров, потери урожая, почва, переуплотнение, агросрок.

Для цитирования: Хафизов К.А., Хафизов Р.Н., Нурмиев А.А., Галиев И.Г., Байгильдеева Е.И. Экологический подход к оптимизации параметров машинно-тракторного агрегата для глубокого рыхления почвы // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 4 (48). С. 79–89. EDN: MHAIOK.

Scientific article

AN ECOLOGICAL APPROACH TO PARAMETER OPTIMIZATION OF THE MACHINE-TRACTOR AGGREGATE FOR CHISEL PLOUGHING

Kamil A. Khafizov¹, Ramil N. Khafizov², Azat A. Nurmiev³✉, Ilgiz G. Galiev⁴, Ekaterina I. Baigildeeva⁵

^{1, 2, 3, 4} Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

⁵ Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ Fts-kgau@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9098-0692>

² ramilajz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0739-0817>

³ azat-nurmiev@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3514-7478>

⁴ drGali@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0595-1898>

⁵ Baigildeeva_e_i@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4611-4412>

Abstract. The purpose of the research is to identify the ways to reduce the integral emission of carbon dioxide into the atmosphere by optimizing the equipment parameters and its operating modes. Numerous computational experiments have been carried out using a mathematical model of the aggregates at deep soil chiselling. The criterion for the aggregate operation efficiency is the minimum integral CO₂ emission by the aggregate over the entire life cycle. The optimal parameters of the chisel cultivator aggregate for the specified operating conditions have been identified: optimal weight – 150 kN, engine power – 477 hp, operating width – 7 m, operating speed – 9.5 km/h. With such values of the main parameters of the tractor and the aggregate, the CO₂ emission into the atmosphere is minimum, 423 kg/ha. Total energy costs will amount to 3,247 MJ/ha, performance for 1 hour of shift time is 3.77 ha/h, per-hectare fuel consumption is 13.8 kg/ha, conventional traction efficiency coefficient is 0.72. The tractor weight change in the direction of increasing or decreasing will lead to an increase in the specific total energy costs and the amount of CO₂ emitted into the atmosphere. The influence of some factors (work volume, planned yield, chisel cultivator specific resistivity, etc.) on the value of the integral CO₂ emission during aggregate operation has been determined. The possibility of reducing the integral emission of carbon dioxide in the range from 100 to 2,000 kg/ha, depending on the aggregate operating conditions and the equipment used, has been revealed. It has been found that a decrease in the resistivity of the chisel cultivator from 16 kN/m to 8 kN/m leads to a decrease in CO₂ emissions from 565 to 325 kg/ha, which will average out at 30 kg/ha per 1 kN/m.

Keywords: ecology, safety, machine and tractor aggregate, greenhouse gases, parameters optimization, crop waste, soil, overconsolidation of soil, harvest time.

For citation: Khafizov K.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A., Galiev I.G., Baygildeeva E.I. An ecological approach to parameter optimization of the machine-tractor aggregate for chisel ploughing. *Vestnik Kurganskoj GSHA*. 2023; (4-48): 79–89. EDN: MHAIOK. (In Russ).

Введение. Использование мобильных машин для механизации технологических процессов при возделывании различных сельскохозяйственных культур является одним из факторов, влияющих на экологическую безопасность аграрного производства [1–3].

Негативное влияние техники на окружающую среду проявляется в нескольких направлениях:

– воздействие на почву, сопровождаемое не только созданием оптимальных условий для роста и развития растений с помощью почвообрабатывающих машин, но и переуплотнением и потерей ее структуры в связи с негативным воздействием движителей тракторов, сопровождаемое снижением урожайности [4–6];

– использование в качестве источника энергии нефтепродуктов ведет к загрязнению атмосферы, накоплению в ней ядовитых для живых организмов веществ, в дальнейшем попадающих и на почву, а также газов, ведущих к повышению парникового эффекта в атмосфере [7–9];

– интенсивное воздействие на почву рабочих органов техники и ее движителей ведет к росту водной и ветровой эрозии, снижению плодородия пашни, загрязнению рек и водоемов, что входит в противоречие с концепцией сохранения многообразия живых организмов на планете и устойчивого развития аграрного производства [10–12].

Совершенствование сельскохозяйственной техники и технологий аграрного производства идет в направлении снижения перечисленных негативных явлений. Сегодня наиболее продвинутой технологией является управление продукционным процессом [13–15], когда в период вегетации растений выявляется и удовлетворяется ряд их потребностей. Данная технология требует совершенствования применяемой техники и оборудования. Они относятся к технике для точного земледелия – при этом улучшается не только их эргономика, но и производительность и функциональные воз-

можности. Однако и для этой техники свойственно негативное влияние на окружающую среду – переуплотнение почвы, выброс парниковых газов. Поэтому проблема обеспечения экологической безопасности при их использовании остается актуальной.

Одним из возможных путей снижения экологической нагрузки на окружающую среду является подбор техники из наличного состава парка, за счет выявления оптимальных параметров трактора и машинно-тракторного агрегата по показателю эффективности – интегральный выброс диоксида углерода [16–20]. Интегральный выброс диоксида углерода является суммой CO₂, выбрасываемого при изготовлении, техническом обслуживании и ремонте техники, CO₂, выделяемого оператором при управлении техникой, получаемого при сжигании топлива двигателем трактора, и самое важное – CO₂, не поглощенного из атмосферы культурным растением из-за потери части урожая [21], связанной с нарушением агротехнического срока выполнения технологической операции и уплотнения почвы движителями трактора. Снижение интегрального выброса CO₂ частично решает большинство экологических проблем, связанных с использованием техники для механизации производственных процессов в растениеводстве, поэтому целью исследований является выявление путей их снижения за счет оптимизации параметров техники и режимов их работы.

Материалы и методы. Проблема снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду решается на основе вычислительных экспериментов, проводимых с использованием системной математической модели машинно-тракторных агрегатов. Рассматриваемая система трактор-оператор-орудие-поле-почва-урожай (ТООППУ) связывает параметры техники с факторами рассматриваемой среды, учитывает влияние техники на формируемый урожай культур (через потери урожая). Показателем

эффективности системы является интегральный выброс диоксида углерода – он должен минимизироваться. Рассматривается математическая модель машинно-тракторного агрегата на глубоком рыхлении почвы, и она выбрана исходя из региональной концепции разноглубинной обработки почвы по культурам и севооборотам. Расчеты проводятся в системе компьютерной математики MATLAB.

Результаты исследований и их обсуждение. Имеется предположение, что количество диоксида углерода, выбрасываемого машинно-тракторными агрегатами при выполнении технологической операции глубокого рыхления почвы, зависит от основных параметров трактора (массы трактора и мощности его двигателя) и агрегата (ширины его захвата и рабочей скорости). Проведем вычислительные эксперименты с использованием математической модели агрегата для глубокого рыхления почвы [22-26] для уточнения этого утверждения.

Исходные данные для расчета:

Площадь поля = 100 га;

Длина гона = 1 км;

Расстояние переезда агрегата = 3 км;

Плотность семян культуры = 800 кг/м³;

Коэффициент прочности несущей поверхности поля = 0,9;

Объем выполняемой агрегатом работы = 1000 га;

Количество тракторов выполняющих операцию = 1;

Число часов работы агрегата за сутки = 16 ч;

Планируемая урожайность основной и побочной продукции = 40 ц/га;

Давление в шинах трактора = 0,16 МПа;

Число колес на одном борту движителей трактора = 1;

Коэффициент сцепления колес трактора с почвой = 0,68;

Коэффициент сопротивления перекачиванию колес трактора = 0,12;

Плотность почвы = 1,3 г/см³;

Удельная масса CO₂, поглощаемая культурой (пшеница), = 243 кг/ц;

Минимальный вес трактора = 60 кН;

Максимальный вес трактора = 240 кН;

Минимальная мощность двигателя = 200 л.с.;

Максимальная мощность двигателя = 500 л.с.;

Максимальная ширина захвата агрегата = 10 м;

Максимальная скорость агрегата = 12 км/ч;

Удельное сопротивление глубокорыхлителя = 14 кН/м [27].

На рисунке 1 графически представлено влияние веса трактора (кН) и мощности его двигателя (л.с.) на величину удельного интегрального выброса диоксида углерода (кг/га). Как видно из рисунка 1, влияние основных параметров трактора на выброс диоксида углерода нелинейное. В заданных пределах основных параметров трактора имеется оптимальное значение веса трактора, которое для заданных условий работы глубокорыхлительного агрегата равняется 150 кН, потребная оптимальная мощность двигателя равна 477 л.с.,

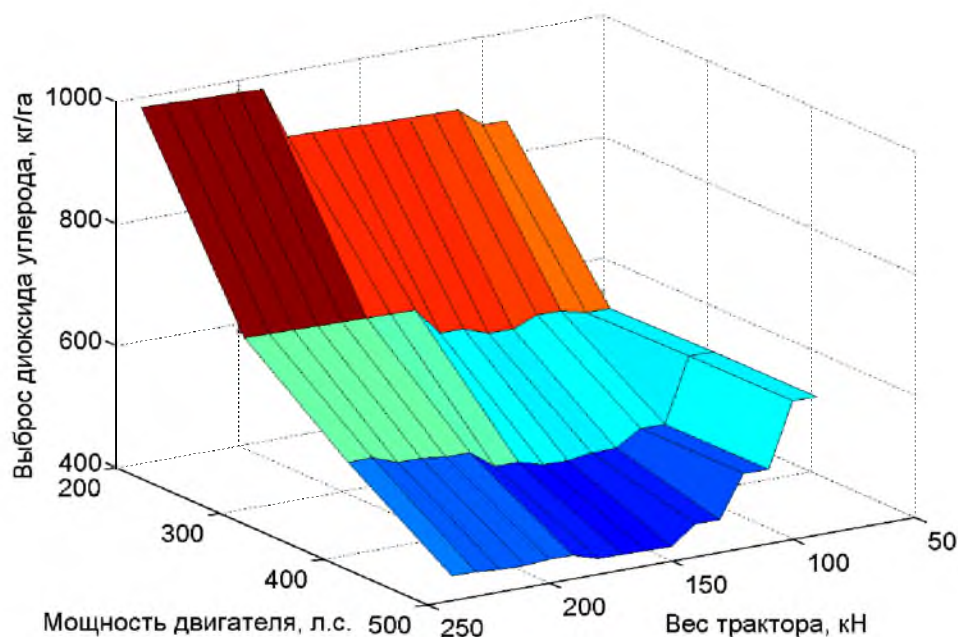


Рисунок 1 – Влияние веса трактора и мощности его двигателя на количество CO₂, выбрасываемого в атмосферу агрегатом глубокорыхлителем

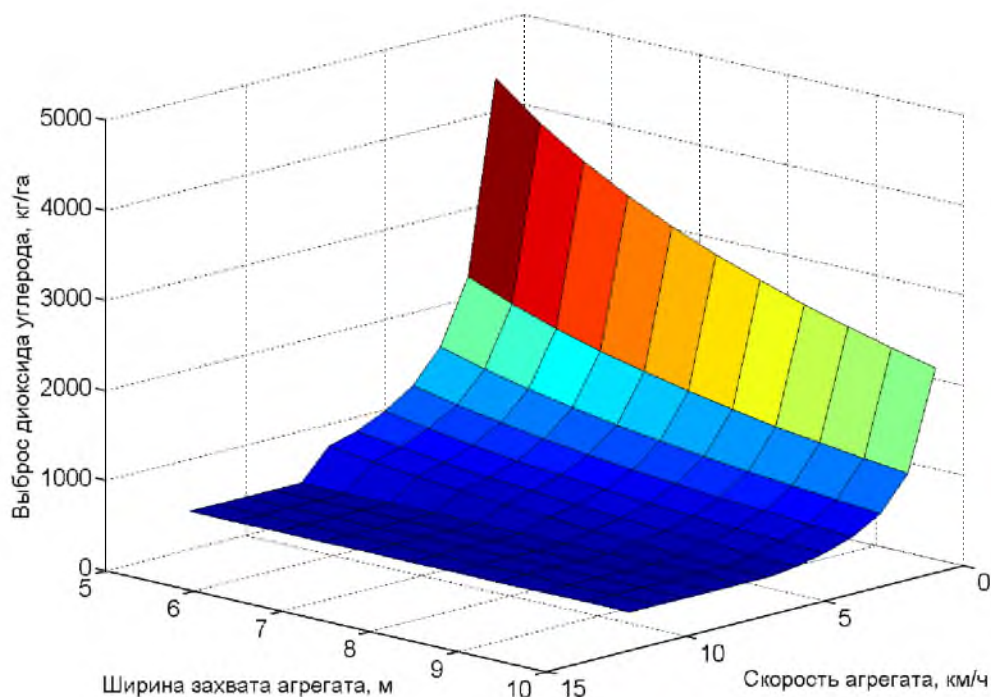


Рисунок 2 – Влияние ширины захвата и скорости агрегата на количество CO_2 , выбрасываемого в атмосферу агрегатом глубокорыхлителем

оптимальная ширина захвата агрегата 7 м, рабочая скорость 9,5 км/ч (рисунок 2). При таких значениях веса трактора и мощности его двигателя обеспечивается минимальный выброс в атмосферу диоксида углерода в размере 423 кг/га. Суммарные энергетические затраты составят 3247 МДж/га, производительность за 1 час времени смены 3,77 га/ч, погектарный расход топлива 13,8 кг/га, условный тяговый коэффициент полезного действия трактора (КПД) равен 0,72. Изменение веса трактора в сторону увеличения или уменьшения приведет к росту удельных суммарных энергетических затрат и количества CO_2 , выбрасываемого в атмосферу.

Следующим вычислительным экспериментом выясним, как зависит удельный интегральный выброс рыхлительным агрегатом диоксида углерода от количества занятых агрегатов при выполнении заданного объема работы. Зададим объем работы, равный 3000 га. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, для выполнения глубокого рыхления почвы на поле площадью 3000 га имеется оптимальное количество агрегатов, равное шести. Отклонение количества занятых агрегатов от оптимального значения ведет к росту выброса диоксида углерода. Если отклонение в меньшую сторону, то увеличатся потери потенциального урожая и меньше поглощается растениями CO_2 из атмосферы. Если отклонение числа агрегатов в большую сто-

рону, то растут косвенные выбросы CO_2 при изготовлении техники, ее техническом обслуживании и ремонте.

В следующих вычислительных экспериментах попытаемся ответить на вопрос, как изменяется оптимальное количество потребных агрегатов при изменении объема выполняемой работы с точки зрения минимального выброса CO_2 в атмосферу. В ходе экспериментов изменим объем работы агрегатов со 100 до 4500 га, что вбирает в себя площади малых и средних фермерских хозяйств. Результаты расчетов приведены на рисунке 4. Как видно из рисунка 4, оптимальное количество потребных агрегатов с целью снижения выброса CO_2 в атмосферу зависит от объема работы в фермерском хозяйстве. Причем эта зависимость нелинейная, и ее можно аппроксимировать приведенным на рисунке 4 полиномом второго порядка. При этом коэффициент множественной корреляции 0,8164, коэффициент детерминации 0,6665, средняя ошибка аппроксимации 2,0026 %.

Из-за нелинейности связи между объемом работы и потребным оптимальным числом агрегатов, выявленным с целью достижения минимального выброса CO_2 в атмосферу, возникает вопрос о правомерности нормативного метода расчета потребного количества техники, которая предусматривает линейную связь между ними. С ростом объема работы интенсивность роста потребного количества техники снижается.

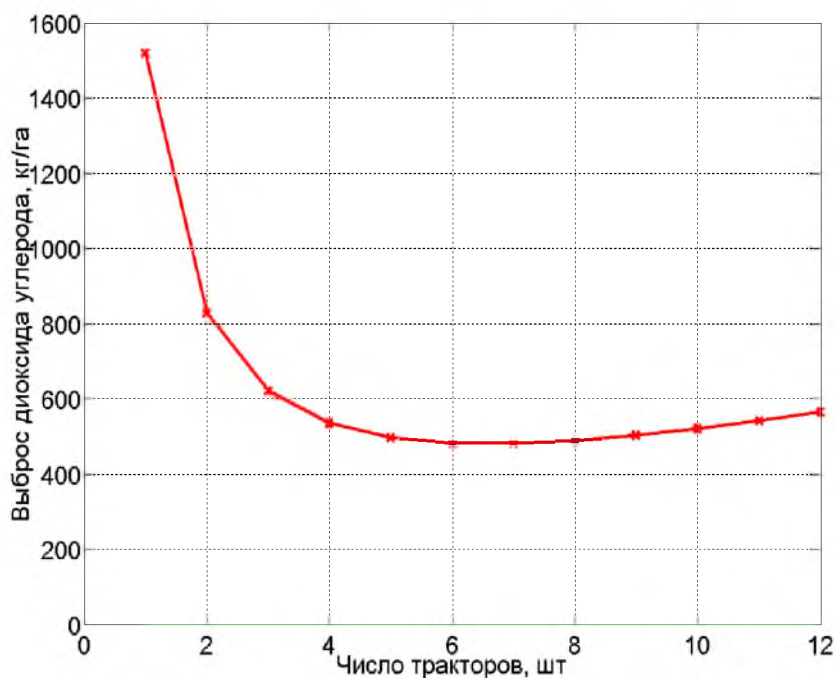


Рисунок 3 – Влияние числа агрегатов, занятых на обработке 3000 га пашни, на удельный интегральный выброс CO₂ в атмосферу

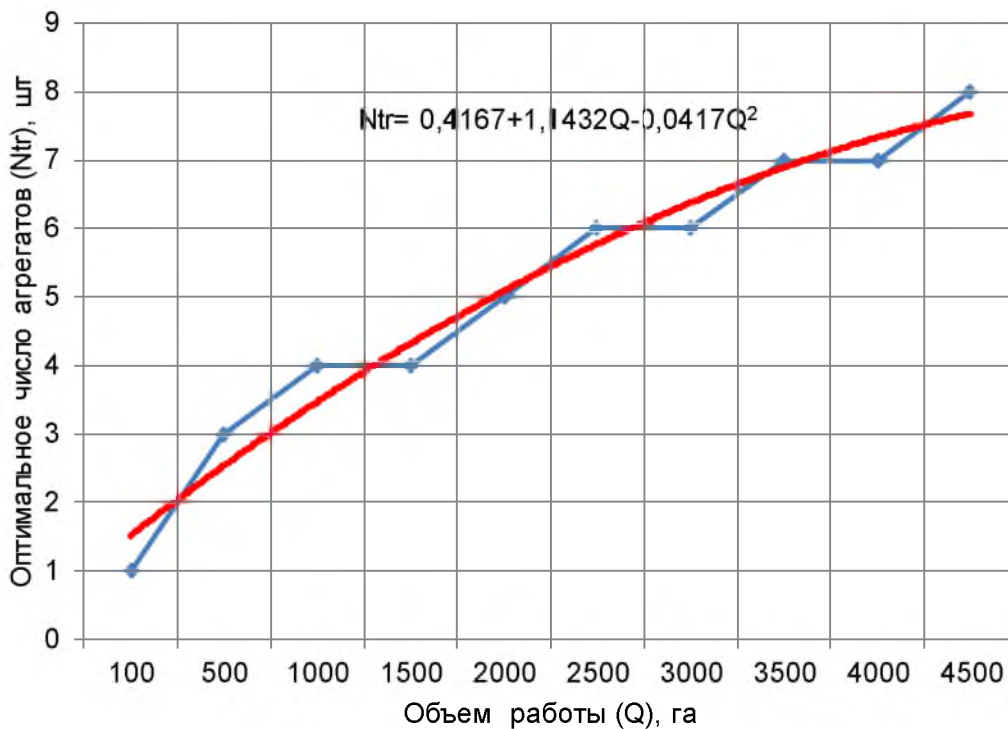


Рисунок 4 – Влияние объема работы агрегатов на их оптимальное потребное количество с целью снижения выброса CO₂ в атмосферу

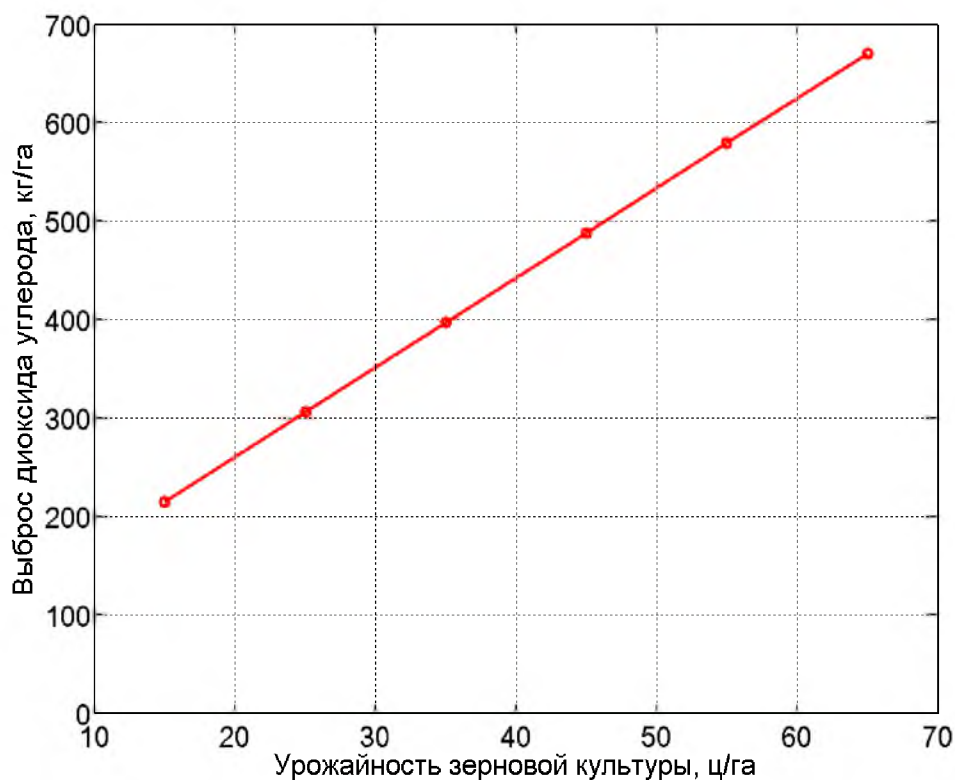


Рисунок 5 – Влияние планируемой урожайности на удельный интегральный выброс CO₂ в атмосферу

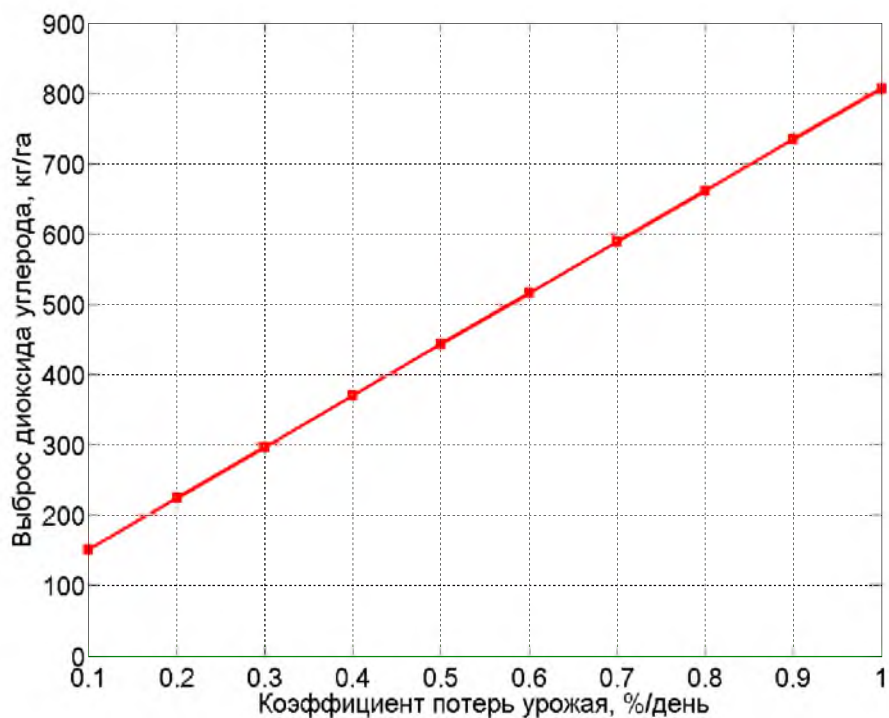


Рисунок 6 – Влияние коэффициента потерь урожая от нарушения агросрока выполнения глубокого рыхления на удельный интегральный выброс CO₂ в атмосферу

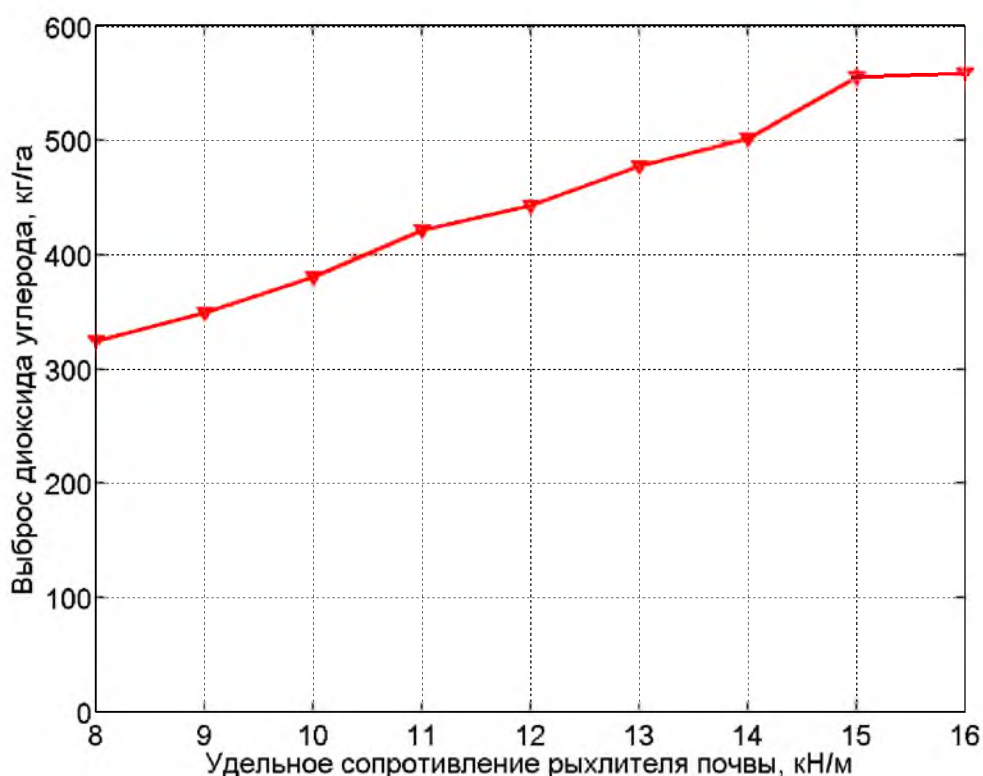


Рисунок 7 – Влияние удельного сопротивления глубокорыхлителя на удельный интегральный выброс CO_2 в атмосферу

На рисунке 5 графически представлено влияние планируемой урожайности зерновой культуры на величину выброса диоксида углерода в атмосферу. С ростом величины планируемой урожайности закономерно будут расти потери урожая от воздействия трактора на формируемый урожай, поэтому возрастает и величина не поглощенного из атмосферы CO_2 , что ведет к росту интегрального выброса диоксида углерода. Связь между интегральным выбросом CO_2 и планируемой урожайностью линейная.

Как видно из рисунка 5, выброс диоксида углерода находится в линейной зависимости от коэффициента потерь урожая в процентах на один день нарушения агротехнического срока выполнения глубокого рыхления. С ростом величины этого коэффициента выброс CO_2 в атмосферу увеличивается.

Рост выброса диоксида углерода в атмосферу с возрастанием удельного сопротивления глубокорыхлителя (рисунок 7), является закономерным процессом, так как при этом возрастает расход топлива на 1 га выполненной работы. Зависимость выброса CO_2 находится в нелинейной зависимости от удельного сопротивления сельскохозяйственной машины.

Заключение. Для снижения интегрального выброса диоксида углерода в атмосферу при глубоком рыхлении почвы необходимо оптимизировать основные параметры трактора (вес тракто-

ра, мощность его двигателя) и агрегата (ширину захвата, рабочую скорость). Эффект находится в пределах от 100 до 2000 кг/га, в зависимости от параметров используемых агрегатов.

Для заданных условий работы агрегата глубокорыхлителя (например: площадь поля 100 га; длина гона 1 км; расстояние переезда агрегата 3 км; коэффициент прочности несущей поверхности поля 0,9; объем выполняемой агрегатом работы 1000 га; количество тракторов, выполняющих операцию 1; число часов работы агрегата за сутки 16 ч; планируемая урожайность основной и побочной продукции 40 ц/га; давление в шинах трактора 0,16 МПа; число колес на одном борту движителей трактора 1; коэффициент сцепления колес трактора с почвой 0,68; коэффициент сопротивления перекатыванию колес трактора 0,12; плотность почвы 1,3 г/см³;) имеется оптимальное значение веса трактора, равное 150 кН, при этом потребная оптимальная мощность двигателя равна 477 л.с., оптимальная ширина захвата агрегата 7 м, рабочая скорость 9,5 км/ч. При таких значениях основных параметров трактора и агрегата обеспечивается минимальный выброс в атмосферу диоксида углерода в размере 423 кг/га. Суммарные энергетические затраты составят 3247 МДж/га, производительность за 1 час времени смены 3,77 га/ч,

погектарный расход топлива 13,8 кг/га, условный тяговый коэффициент полезного действия трактора (КПД) равно 0,72. Изменение веса трактора в сторону увеличения или уменьшения приведет к росту удельных суммарных энергетических затрат и количества CO₂, выбрасываемого в атмосферу.

Одним из приемов снижения выброса CO₂ в атмосферу является правильный подбор количества техники для выполнения заданного объема работы. При этом достигается эффект от 150 до 1000 кг/га. Недостаточное количество агрегатов по сравнению с оптимальным оказывает более интенсивное влияние на выброс диоксида углерода, чем их переизбыток.

Зависимость между объемом работы и потребным оптимальным числом агрегатов является нелинейной. В связи с этим при росте объема работы интенсивность увеличения потребного оптимального количества техники снижается.

При больших значениях планируемой урожайности потери урожая увеличиваются, в связи с чем растет величина интегрального выброса диоксида углерода в атмосферу.

Снижение удельного сопротивления глубоких рыхлителя с 16 кН/м до 8 кН/м приводит к снижению выброса CO₂ с 565 до 325 кг/га, что составит в среднем 30 кг/га на 1 кН/м.

Список источников

1. Инновационные разработки по утилизации отработанных этаноламинов с узла очистки диоксида углерода на агрегатах аммиака / С.В. Афанасьев [и др.] // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 5. С. 28-33. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-5-28-33. EDN: OCJYOK.
2. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Влияние уровня эксплуатации техники на показатели использования тракторов в аграрном производстве // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10. № 4 (38). С. 38-40. DOI: 10.12737/17614. EDN: VLQMGX.
3. Kantyukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Media corrosiveness and materials resistance at presence of aggressive carbon dioxide // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2021. Vol. 64. No. 11. Pp. 793-801. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-11-793-801. EDN: ZUZXEY.
4. Балансовая оценка динамики диоксида углерода в почве больших лизиметров МГУ / А.В. Смагин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2021. № 3. С. 38-44. EDN: OTKQXO.
5. Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Моштова А.С. Влияние лесных посадок на эмиссию диоксида углерода из почвы в Поволжье и Подонье // Лесоведение. 2022. № 4. С. 339-350. DOI: 10.31857/S0024114822040118. EDN: BPPAKK.
6. Филиппов С.П., Жданеев О.В. Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 5-21. DOI: 10.56304/S0040363622090016. EDN: EQWLHW.
7. Седнин В.А., Игнатович Р.С. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65. № 6. С. 524-538. DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538. EDN: NHTJZD.
8. Эксергетический анализ новых термодинамических циклов с улавливанием диоксида углерода / А.С. Косой [и др.] // Теплоэнергетика. 2023. № 7. С. 29-50. DOI: 10.56304/S0040363623070032. EDN: AUZHGG.
9. Филиппов С.П. Экономические характеристики технологий улавливания и захоронения диоксида углерода (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 10. С. 17-31. DOI: 10.56304/S0040363622100022. EDN: DPHTLR.
10. Потоки диоксида углерода при разном режиме использования сенокоса на осушенной торфяной почве / А.Г. Молчанов [и др.] // Агрохимия. 2020. № 9. С. 48-64. DOI: 10.31857/S0002188120090094. EDN: WBXZJI.
11. Диханбаев Б.И., Диханбаев А.Б. К вопросу минимизации выбросов диоксида углерода в атмосферу при переработке техногенных отходов // Комплексное использование минерального сырья. 2020. № 3 (314). С. 40-49. DOI: 10.31643/2020/6445.25. EDN: SWSKEM.
12. Управление параметрами топливоподачи с целью снижения выбросов диоксида углерода судовыми дизельными двигателями / В.А. Туркин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4-1 (58). С. 106-112. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.030. EDN: NIUVVG.
13. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // Плодородие. 2021. № 6 (123). С. 38-41. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.10. EDN: MALLBW.
14. Уханов А.П., Сидоров Е.А., Сидорова Л.И. Теоретическая оценка эксплуатационных показателей машинно-тракторных агрегатов при работе дизеля на различных видах бионефтяного топлива //

Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 3 (63). С. 236-242. DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-236-242. EDN: НКOFHZ.

15. Назаров Н.Н., Некрасова И.В. Оценка и выбор машинно-тракторных агрегатов при культивации по энергетическим затратам // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2022. Т. 52. № 1. С. 70-80. DOI: 10.26898/0370-8799-2022-1-8. EDN: BCGPPD.

16. Иванов А.Б., Таркивский В.Е., Трубицын Н.В. Новый метод определения энергетических параметров работы машинно-тракторных агрегатов // Техника и оборудование для села. 2020. № 9 (279). С. 10-15. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-9-10-15. EDN: CZXXIV.

17. Моделирование нетто-экосистемного обмена диоксида углерода сенокоса на осушенной торфяной почве: анализ сценариев использования / Д.В. Ильясов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 6. С. 1427-1449. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449. EDN: XEZZRH.

18. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата «Метеор-М» № 2 / В.В. Голомолзин [и др.] // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 79-95. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-4-79-95. EDN: GPXENP.

19. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н. Определение количества техники, необходимой для сельского хозяйства Татарстана // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10. № 1 (35). С. 82-88. DOI: 10.12737/11384. EDN: TWNJHT.

20. Чучкалов С.И. Совершенствование методики проектирования почвозащитных технологий на склоновых агроландшафтах // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 3 (71). С. 111-116. DOI: 10.12737/2073-0462-2023-111-116. EDN: SETSDE.

21. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н., Нурмиев А.А. Метод расчета выброса диоксида углерода машинно-тракторными агрегатами на технологических операциях, с учетом влияния параметров агрегатов на формируемый урожай зерновых культур // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 2 (66). С. 106-112.

22. Пути снижения выброса в атмосферу диоксида углерода на производственных процессах в растениеводстве / Р.Н. Хафизов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрно-

го университета. 2021. Т. 16. № 3 (63). С. 38-42. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-38-42. EDN: DIBZCJ.

23. Хафизов К.А. Снижение суммарных энергетических затрат на технологических операциях в АПК – путь снижения выбросов парниковых газов в атмосферу // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 3 (63). С. 43-47. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-43-47. EDN: XMJESX.

24. The thermodynamic calculation of offset shafts rotary engine ideal cycle with external heat supply / С.А. Khafizov [et al.] // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2019. Vol. 9. No. 4. Pp. 1109-1116. DOI: 10.24247/ijmperdaug2019114. EDN: KAEWGB.

25. Хафизов К.А., Халиуллин Ф.Х. Пути повышения эффективности использования машинно-тракторных агрегатов // Техника и оборудование для села. 2015. № 10. С. 20-22. EDN: UQFKLR.

26. Efficiency of tractor track scarifiers used for sowing grain crops / С.А. Khafizov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. P. 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/996/1/012005. EDN: AWLEEG.

27. Оптимальные параметры трактора и пахотного агрегата по различным критериям оптимизации / К.А. Хафизов [и др.] // Аграрный научный журнал. 2023. № 1. С. 155-160.

References

1. Afanasiev S.V. et al. Innovacionnye razrabotki po utilizacii otrabotannyh jetanolaminov s uzla ochistki dioksida ugleroda na agregatah ammiaka [Innovative developments for the recycling of waste ethanolamines from a carbon dioxide purification unit at ammonia units]. *Ecology and Industry of Russia*. 2020; (24-5): 28-33. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-5-28-33. EDN: OCJYOK. (In Russ).

2. Galiev I.G., Khusainov R.K. Vlijanie urovnja jekspluatacii tehniki na pokazateli ispol'zovanija traktorov v agrarnom proizvodstve [The influence of the level of equipment operation on the indicators of the use of tractors in agricultural production]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2015; (10-4-38): 38-40. DOI: 10.12737/17614. EDN: VLQMGX. (In Russ).

3. Kantyukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Media corrosiveness and materials resistance at presence of aggressive carbon dioxide. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021; (64-11): 793-801. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-11-793-801. EDN: ZUZXEY.

4. Smagin A.V. et al. Balansovaja ocenka dinamiki dioksida ugleroda v pochve bol'shih lizimetrov MGU [Balance assessment of carbon dioxide dynam-

- ics in the soil of large MSU lysimeters]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2021; (3): 38-44. EDN: OTKQXO. (In Russ).
5. Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Mostovaya A.S. Vlijanie lesnyh posadok na jemissiju dioksida ugleroda iz pochvy v Povolzh'e i Podon'e [The influence of forest plantings on the emission of carbon dioxide from soil in the Volga and Don regions]. *Lesovedenie*. 2022; (4): 339-350. DOI: 10.31857/S0024114822040118. EDN: BPPAKK. (In Russ).
6. Filippov S.P., Zhdaneev O.V. Vozmozhnosti ispol'zovanija tehnologij ulavlivanija i zahoronenija dioksida ugleroda pri dekarbonizacii mirovoj jekonomiki (obzor) [Opportunities for using carbon dioxide capture and storage technologies in decarbonizing the global economy (review)]. *Teploenergetika*. 2022; (9): 5-21. DOI: 10.56304/S0040363622090016. EDN: EQWLHW. (In Russ).
7. Sednin V.A., Ignatovich R.S. Analiz jeffektivnosti tehnologij izvlechenija dioksida ugleroda iz produktov sgoranija [Analysis of the effectiveness of technologies for extracting carbon dioxide from combustion products]. *Jenergetika. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij i jenergeticheskikh ob#edinenij SNG*. 2022; (65-6): 524-538. DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538. EDN: NHTJZD. (In Russ).
8. Kosoj A.S. et al. Jeksergeticheskij analiz novyh termodinamicheskikh ciklov s ulavlivanijem dioksida ugleroda [Exergy analysis of new thermodynamic cycles with carbon dioxide capture]. *Teploenergetika*. 2023; (7): 29-50. DOI: 10.56304/S0040363623070032. EDN: AUZHGZ. (In Russ).
9. Filippov S.P. Jekonomicheskie karakteristiki tehnologij ulavlivanija i zahoronenija dioksida ugleroda (obzor) [Economic characteristics of carbon dioxide capture and disposal technologies (review)]. *Teploenergetika*. 2022; (10): 17-31. DOI: 10.56304/S0040363622100022. EDN: DPHTLR. (In Russ).
10. Molchanov A.G. et al. Potoki dioksida ugleroda pri raznom rezhime ispol'zovanija senokosa na osushennoj torfjanoy pochve [Carbon dioxide fluxes under different regimes of haymaking on drained peat soil]. *Agrohimiya*. 2020; (9): 48-64. DOI: 10.31857/S0002188120090094. EDN: WBJXZI. (In Russ).
11. Dikhanbaev B.I., Dikhanbaev A.B. K voprosu minimizacii vybrosov dioksida ugleroda v atmosferu pri pererabotke tehnogennyh othodov [On the issue of minimizing carbon dioxide emissions into the atmosphere when processing industrial waste]. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ja*. 2020; (3-314): 40-49. DOI: 10.31643/2020/6445.25. EDN: SWSKEM. (In Russ).
12. Turkin V.A. et al. Upravlenie parametrami toplivopodachi s cel'ju snizhenie vybrosov dioksida ugleroda sudovymi dizel'nymi dvigateljami [Controlling fuel delivery parameters to reduce carbon dioxide emissions from marine diesel engines]. *Morskie intellektual'nye tehnologii*. 2022; (4-1-58): 106-112. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.030. EDN: NIUVVG. (In Russ).
13. Sychev V.G., Naliukhin A.N. Izuchenie potokov ugleroda i azota v dlitel'nyh polevyh opytah geoseti s cel'ju snizhenija vybrosov parnikovyh gazov i povyshenija deponirovanija dioksida ugleroda agrocenozami [Study of carbon and nitrogen flows in long-term field experiments of a geonet-work in order to reduce greenhouse gas emissions and increase the sequestration of carbon dioxide by agrocenoses]. *Plodородie*. 2021; (6-123): 38-41. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.10. EDN: MALLBW. (In Russ).
14. Ukhanov A.P., Sidorov E.A., Sidorova L.I. Teoreticheskaja ocenka jekspluatacionnyh pokazatelej mashinno-traktornyh agregatov pri rabote dizelja na razlichnyh vidah bioneftjanogo topliva [Theoretical assessment of the performance indicators of machine and tractor units when operating a diesel engine on various types of bio-oil fuel]. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2023; (3-63): 236-242. DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-236-242. EDN: HKOFHZ. (In Russ).
15. Nazarov N.N., Nekrasova I.V. Ocenka i vybor mashinno-traktornyh agregatov pri kul'tivacii po jenergeticheskim zatratam [Evaluation and selection of machine and tractor units for cultivation based on energy costs]. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2022; (52-1): 70-80. DOI: 10.26898/0370-8799-2022-1-8. EDN: BCGPPD. (In Russ).
16. Ivanov A.B., Tarkivsky V.E., Trubitsyn N.V. Novyj metod opredelenija jenergeticheskikh parametrov raboty mashinno-traktornyh agregatov [A new method for determining the energy parameters of machine and tractor units]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020; (9-279): 10-15. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-9-10-15. EDN: CZXXIV. (In Russ).
17. Ilyasov D.V. et al. Modelirovanie netto-jekosistemnogo obmena dioksida ugleroda senokosa na osushennoj torfjanoy pochve: analiz scenarijev ispol'zovanija [Modeling net ecosystem carbon dioxide exchange of haymaking on drained peat soil: analysis of use scenarios]. *Computer research and modeling*. 2020; (12-6): 1427-1449.

DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449.
EDN: XEZZRH. (In Russ).

18. Golomolzin V.V. et al. Opredelenie obshhego soderzhanija dioksida ugleroda nad territoriej Rossii po dannym otechestvennogo kosmicheskogo apparata «Meteor-M» № 2 [Determination of the total content of carbon dioxide over the territory of Russia according to data from the domestic spacecraft «Meteor-M» No. 2]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2022; (4): 79-95. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-4-79-95. EDN: GPXEHP. (In Russ).

19. Khafizov K.A., Khafizov R.N. Opredelenie količestva tehniki, neobhodimoj dlja sel'skogo hozjajstva Tatarstana [Determining the amount of equipment needed for agriculture in Tatarstan]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2015; (10-1-35): 82-88. DOI: 10.12737/11384. EDN: TWNJHT. (In Russ).

20. Chuchkalov S.I. Sovershenstvovanie metodiki proektirovanija pochvozashhitnyh tehnologij na sklonovyh agrolandshaftah [Improving the methodology for designing soil protection technologies on slope agricultural landscapes]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2023. (18-3-71): 111-116. DOI: 10.12737/2073-0462-2023-111-116. EDN: SETSDE. (In Russ)

21. Khafizov K.A., Khafizov R.N., Nurmiev A.A. Metod rasčeta vybroša dioksida ugleroda mashinno-traktornymi agregatami na tehnologičeskijh operacijah, s učetom vlijanija parametrov agregatov na formiruemyj urozhaj zernovyh kul'tur [Method for calculating carbon dioxide emissions from machine and tractor units during technological operations, taking into account the influence of unit parameters on the generated grain yield]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University* 2022; (17-2-66): 106-112. (In Russ).

22. Khafizov R.N. et al. Puti snizhenija vybroša v atmosferu dioksida ugleroda na proizvodstvennyh processah v rastenievodstve [Ways to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere during production processes in crop production]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2021; (16-3-63): 38-42. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-38-42. EDN: DIBZCJ. (In Russ).

23. Khafizov K.A. Snizhenie summarnyh jenergetičeskijh zatrat na tehnologičeskijh operacijah v APK – put' snizhenija vybrošov parnikovyh gazov v atmosferu [Reducing the total energy costs of technological operations in the agro-industrial complex is a way to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2021; (16-3-63): 43-47. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-43-47. EDN: XMJESX. (In Russ).

24. Khafizov C.A. et al. The thermodynamic calculation of offset shafts rotary engine ideal cycle with external heat supply. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019; (9-4): 1109-1116. DOI: 10.24247/ijmperdaug2019114. EDN: KAEWGB.

25. Khafizov K.A., Khaliullin F.Kh. Puti povyšeniija jeffektivnosti ispol'zovanija mashinno-traktornyh agregatov [Ways to improve the efficiency of using machine and tractor units]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2015; (10): 20-22. EDN: UQFKLR. (In Russ).

26. Khafizov C.A. et al. Efficiency of tractor track scarifiers used for sowing grain crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022: 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/996/1/012005. EDN: AWLEEG.

27. Khafizov K.A. et al. Optimal'nye parametry traktora i pahotnogo agregata po različnym kriterijam optimizacii [Optimal parameters of the tractor and arable unit according to various optimization criteria]. *The Agrarian Scientific Journal*. 2023; (1): 155-160.

Информация об авторах

К.А. Хафизов – доктор технических наук, профессор; AuthorID 566517.

Р.Н. Хафизов – кандидат технических наук; AuthorID 627043.

А.А. Нурмиев – AuthorID 617768.

И.Г. Галиев – доктор технических наук, доцент; AuthorID 106081.

Е.И. Байгильдеева – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 1023440.

Information about the author

K.A. Khafizov – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 566517.

R.N. Khafizov – Candidate of Technical Sciences; AuthorID 627043.

A.A. Nurmiev – AuthorID 617768.

I.G. Galiev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 106081.

E.I. Baygildeeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 1023440.

Статья поступила в редакцию 20.10.2023; одобрена после рецензирования 06.11.2023; принята к публикации 12.12.2023.

The article was submitted 20.10.2023; approved after reviewing 06.11.2023; accepted for publication 12.12.2023.