

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА/TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEXDOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.66.5>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ В КАРТОФЕЛЕВОДСТВЕ**

Научная статья

Фомичев А.И.¹, Калинин А.Б.², Теплинский И.З.³, Сарнецкий И.В.^{4,*}¹ ORCID : 0000-0003-4038-876X;² ORCID : 0000-0002-6301-5758;³ ORCID : 0000-0002-5004-9457;^{1, 2, 3, 4} Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Пушкин, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (isarnezkij[at]gmail.com)

Аннотация

Статья посвящена вопросам применения технологии внесения отработавших газов при возделывании картофеля с целью снижения затрат на внесение минеральных удобрений и повышения устойчивости растений к воздействию патогенных микроорганизмов в неблагоприятных погодных условиях. На основании обзора литературных источников была предложена схема устройства внесения отработавших газов трактора в почву во время посадки картофеля непосредственно в зону размещения семенных клубней. Формирование гребня из рыхлой почвы во время посадки картофеля позволяет равномерно распределить отработавшие газы в зоне формирования основной массы корневой системы растений и исключить отток влаги ввиду стабилизации температурного режима в зоне размещения семенного материала. Почвенная биота при повышенной влажности почвы более интенсивно перерабатывает окислы азота NO_x в азотистые соединения, доступные для растений, что позволяет снизить потребность во внесении дорогостоящих минеральных удобрений. В работе представлена схема управления температурным режимом подачи отработавших газов, которая устанавливается в системе их внесения в почву. Предлагаемая система может использоваться как при выполнении посадочных работ, так и при уходе за посадками при окончательном формировании гребневой поверхности поля.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, декарбонизация, окислы азота NO_x, технология возделывания картофеля.

USE OF EXHAUST GAS DECARBONISATION TECHNOLOGY IN THE OPERATION OF MACHINE-TRACTOR UNITS IN POTATO FARMING

Research article

Fomichev A.I.¹, Kalinin A.B.², Teplinskii I.Z.³, Sarnetskii I.V.^{4,*}¹ ORCID : 0000-0003-4038-876X;² ORCID : 0000-0002-6301-5758;³ ORCID : 0000-0002-5004-9457;^{1, 2, 3, 4} Saint-Petersburg State Agrarian University, Pushkino, Russian Federation

* Corresponding author (isarnezkij[at]gmail.com)

Abstract

The article is devoted to the application of exhaust gas technology in potato farming with the aim of reducing the cost of mineral fertilisers and increasing plant resistance to pathogenic microorganisms in adverse weather conditions. Based on a literature review, a scheme was suggested for the device for introducing tractor exhaust gases into the soil during potato planting directly into the seed tuber placement zone. Forming a ridge of loose soil during potato planting allows for the even distribution of exhaust gases in the area where the main mass of the plant root system is formed and prevents moisture loss due to the stabilisation of the temperature regime in the seed placement area. When soil moisture is high, soil biota more intensively processes nitrogen oxides (NO_x) into nitrogen compounds that are available to plants, which reduces the need for expensive mineral fertilisers. The paper presents a scheme for controlling the temperature of exhaust gases, which is installed in the system for their introduction into the soil. The proposed system can be used both during planting and when caring for plantings during the final formation of the ridge surface of the field.

Keywords: internal combustion engine, exhaust gases, decarbonisation, nitrogen oxides NO_x, potato cultivation technology.

Введение

В настоящее время наиболее острой стала проблема уменьшения загрязнения атмосферного воздуха токсическими веществами, выделяемыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) [1], [2]. Эта проблема особенно актуальна для сельскохозяйственного производства, так как около 60% мощностей сельского хозяйства приходится на долю двигателей внутреннего сгорания, работающих на дизельном топливе и бензине.

В современных условиях сельское хозяйство располагает возможностями по сохранению или увеличению плодородия почвы путем внесения органических, бактериальных и минеральных удобрений [3], [4]. Процесс

рационального использования удобрений с целью повышения урожайности возделываемых культур без снижения уровня плодородия почв можно оптимизировать за счет своевременного внесения различных элементов питания и оперативного контроля выполнения технологического процесса.

В то же время на сегодняшний момент существуют альтернативные приемы повышения плодородия почвы, используемые в углеродном земледелии, когда в качестве удобрения используют отработавшие газы (ОГ) двигателей внутреннего сгорания машинно-тракторных агрегатов (МТА) [5]. При этом опыты внесения отработавших газов ($\text{CH}+\text{CO}_2$) в почву известны более 100 лет.

Материалы и методы

Картофель — одна из важных культур в сельском хозяйстве, он используется на продовольственные, кормовые и технические цели. По данным одного из исследований примерно 60 % выращиваемого в мире картофеля употребляется для еды человеком, 15% — на корм животным, 5% — как промышленное сырьё и 11% — на посадку [6], [7].

Современные технологии выращивания картофеля подразумевают использование большого количества удобрений. Без внесения удобрений мы не получим высокого урожая картофеля и хорошего качества и вкуса клубней. По данным, полученным в различных зонах, картофель на каждые 100 кг урожая выносит в действующем веществе: 0,4–0,6 кг азота, 0,15–0,25 — фосфора и 0,6–1,0 — калия, 0,2–0,4 — серы, 0,1–0,25 — магния, 0,25–0,5 кг — кальция и ряд микроэлементов [3].

Питательные вещества следует вносить еще до посадки культуры или в момент их необходимости, размещая непосредственно в зоне их поглощения культурой. Предпосевное внесение удобрений проводится или разбросным, или ленточным способом. Лучшие результаты дает внесение удобрений именно ленточным способом [4]. В то же время в составе выхлопных газов дизельных двигателей, которые устанавливаются на тракторах, используемых для агрегатирования сельскохозяйственных машин и орудий, находится ряд химических элементов, необходимых для питания растений. К ним можно отнести углекислый газ CO_2 , азот N_2 и его окислы NO_x , сера S, углерод C и ряд микроэлементов, необходимых для нормального развития растений. В таблице 1 представлен состав ОГ дизельного двигателя [8].

Таблица 1 - Состав отработавших газов дизельного ДВС

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.66.5.1>

Компонент	Дизель, %
N_2	76...78
O_2	2...8
CO_2	1...10
CO	0,01...0,50
Пары воды	0,5...4,0
NO_x	0,001...0,400
CH	0,01...0,10
Альдегиды	0...0,002

Примечание: источник [8]

Для улучшения экологической обстановки при выполнении полевых работ машинно-тракторными агрегатами предлагается выполнять декарбонизацию ОГ, направляя их в верхний слой почвы. Данный технологический прием можно реализовать при обработке почвы и во время проведения посадочных работ, когда рабочие органы взаимодействуют с верхним слоем, создавая в нем пористую структуру, способную вместить значительный объем ОГ. Так как ОГ тяжелее воздуха, то они будут удерживаться в почве в течение длительного времени и перерабатываться почвенной биотой, а также усваиваться листьями растениями. Так, например, повышенное содержание углекислого газа в верхнем слое почвы приводит к увеличению интенсивности фотосинтеза в листьях растений, что способствует повышению их продуктивности [9], [10]. Такой технологический прием нашел свое применение при возделывании целого ряда сельскохозяйственных культур [11]. Однако при возделывании картофеля он не находил своего широкого применения.

Анализ технологий возделывания картофеля показал, что почвосберегающий способ выращивания клубней предусматривает минимизацию числа операций за счет активизации природных процессов влагопереноса под действием температурного градиента [12], [13]. Под действием природных явлений в зимнее время происходит формирование мелкокомковатой структуры почвы, что позволяет проводить посадку картофеля комбинированным картофелепосадочным агрегатом без предварительной предпосадочной обработки [14]. При работе такого энергоёмкого картофелепосадочного агрегата заделка ОГ в зону размещения посадочного материала позволит выполнить заделку посадочного материала позволит утилизировать их значительный объем.

Высокой энергоёмкостью обладают также мероприятия по глубокой обработке почвы [15], [16]. В почвосберегающих технологиях глубокое рыхление почвы выполняют в качестве основной, а также междурядной обработки. Для устранения уплотнения, созданного ходовыми системами картофелепосадочного агрегата, необходимо

выполнять глубокое рыхление междурядий в течение первых суток после прохода картофелепосадочной машины, пока не высохла уплотненная почва. Для этой цели применяются пропашные культиваторы-глубокорыхлители, каждая секция которого включает в себя глубокорыхлительную лапу на жесткой подпружиненной стойке, окучивающий корпус, две боковые рыхлительные лапы на пружинных S-образных стойках, профилированный прутковый каток и роторный лункователь, установленный в междурядье [17]. Во время прохода такого культиватора происходит дополнительное крошение почвы внутри гребней, а в междурядьях образуется рыхлая структура, обеспечивающая формирование лунок глубиной до 20 см при перекатывании лопастей лункователя под собственным весом. При подаче ОГ в патрубки, установленные позади рыхлительных лап пропашного культиватора-глубокорыхлителя, они заполняют крупные поры внутри гребней и в междурядьях, а также оседают на дне лунок [18].

Таким образом, при возделывании картофеля по энергосберегающей технологии можно обеспечить декарбонизацию значительного объема ОГ за счет их заделки в гребни и междурядья, так как посадка картофеля комбинированным посадочным агрегатом и междурядная обработка культиватором-глубокорыхлителем являются наиболее энергоемкими операциями, требующие до 80% затрат топлива, используемого в период вегетации растений.

Основные результаты

Для реализации технологического приема внесения ОГ при выполнении посадки картофеля разработана конструктивно-технологическая схема устройства для подачи ОГ в почву, которая может быть адаптирована к тракторам любой конструкции. Данная схема приведена на рисунке 1. В состав картофелепосадочного машинно-тракторного агрегата входит трактор 1. Рядом с выходом ОГ из выхлопной трубы 2 установлен газозаборный патрубок 3 предлагаемой системы. При этом расстояние между газозаборным патрубком и выходом выхлопной трубы может меняться для управления температурным режимом путем смешивания ОГ с наружным воздухом. Далее, охлажденные таким образом ОГ по трубопроводу 4 поступают в центробежный вентилятор 5, который под давлением подает воздушную смесь в распределитель 6. Вентилятор приводится во вращение от гидромотора 7, соосно с ним установленным. Из распределителя воздушная смесь ОГ под давлением направляется в сошниковую группу картофелепосадочного агрегата по гибким гофрированным трубопроводам 8. Сошниковая группа состоит из рыхлительных лап 9, установленных перед каждым сошником 10. Эти лапы готовят почву в зоне размещения семенного материала. Клубни картофеля из бункера 12 высаживающим аппаратом подаются на дно борозды, сформированной сошником 10, после чего заделываются рыхлой почвой заделывающими дисками 11. Для формирования рыхлого полнообъемного гребня позади заделывающих дисков устанавливается окучивающий корпус 13, а упрочнение гребней производится профилированным прутковым катком 14. При работе предлагаемой системы ОГ вместе с картофелем поступают в почву и оседают в крупных воздушных порах внутри рыхлого гребня. При этом повышенная концентрация ОГ непосредственно в зоне размещения семенного материала способствует обеззараживанию почвы и ускоряет появление всходов [19].

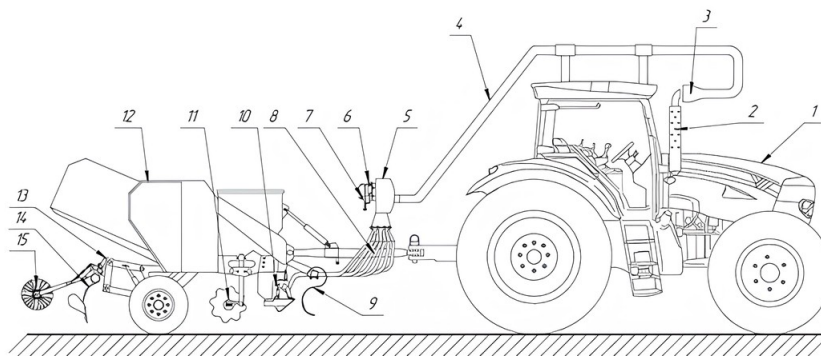


Рисунок 1 - Схема системы внесения ОГ при работе картофелепосадочного агрегата

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.66.5.2>

Примечание: 1 – трактор; 2 – выхлопная труба; 3 – газозаборный патрубок; 4 – трубопровод; 5 – центробежный вентилятор; 6 – распределитель; 7 – гидромотор; 8 – гибкие гофрированные трубопроводы; 9 – рыхлительные лапы; 10 – сошник; 11 – заделывающие диски; 12 – бункер; 13 – окучивающий корпус; 14 – профилированный прутковый каток

Аналогичная система устанавливается и на пропашном культиваторе-глубокорыхлителе, который устраняет уплотнение в дне междурядий и дополнительно рыхлит гребень в зоне формирования клубней нового урожая. Подача ОГ в почву через трубки, установленные позади рыхлительных лап, повышает их концентрацию внутри гребней и частично оседает внутри рыхлых междурядий и на дне лунок.

Ввиду того, что ОГ ДВС обладают высокой температурой, которая находится в пределах от 120 до 250°, то для снижения рисков получения ожогов тела у обслуживающего персонала, а также обеспечения безопасного температурного режима работы технических систем требуется их охлаждение до момента поступления в центробежный вентилятор. На сегодняшний день известно два способа охлаждения ОГ: путем установки в систему теплообменника, либо за счет смешивания ОГ с окружающим воздухом [5].

Для повышения эффективности применения ОГ предложено использовать комбинированную систему их охлаждения, чтобы обеспечить более высокую плотность, гарантирующее оседание внутри крупных пор и на дне лунок. Длительная экспозиция ОГ внутри почвы обеспечивает более эффективное обеззараживание зоны размещения семенного материала и формирования клубней нового урожая, а также способствует более полному усвоению почвой углерода и окислов азота NO_x , а повышенная концентрация углекислого газа CO_2 обеспечивает более интенсивное протекание фотосинтеза в листьях растений, что все суммарно приводит к увеличению урожайности картофеля. Данная комбинированная система охлаждения ОГ представлена на рисунке 2. Согласно представленной схеме, ОГ из выхлопной трубы 1 под действием вакуума, через газозаборный раструб 2 направляются в сажеуловитель 4. При этом расстояние между выхлопной трубой и газоприемным раструбом регулируется с помощью актуатора 3. Из сажеуловителя ОГ поступают в интеркулер 6, расположенный на крыше энергетического средства. На выходе из интеркулера установлен температурный датчик 7, который регистрирует текущее значение температуры. Сигнал от датчика температуры поступает в управляющее устройство 5, которое оценивает текущую температуру ОГ и при отклонении от заданных значений, подает сигнал на актуатор для удаления или приближения газозаборного раструба к выхлопной трубе, что обеспечивает постоянный температурный режим газовоздушной смеси, поступающей в почву. Подача ОГ в почву производится через центробежный вентилятор 8, гибкие шланги 9, присоединенные к рабочим органам посадочного или почвообрабатывающего агрегата 10.

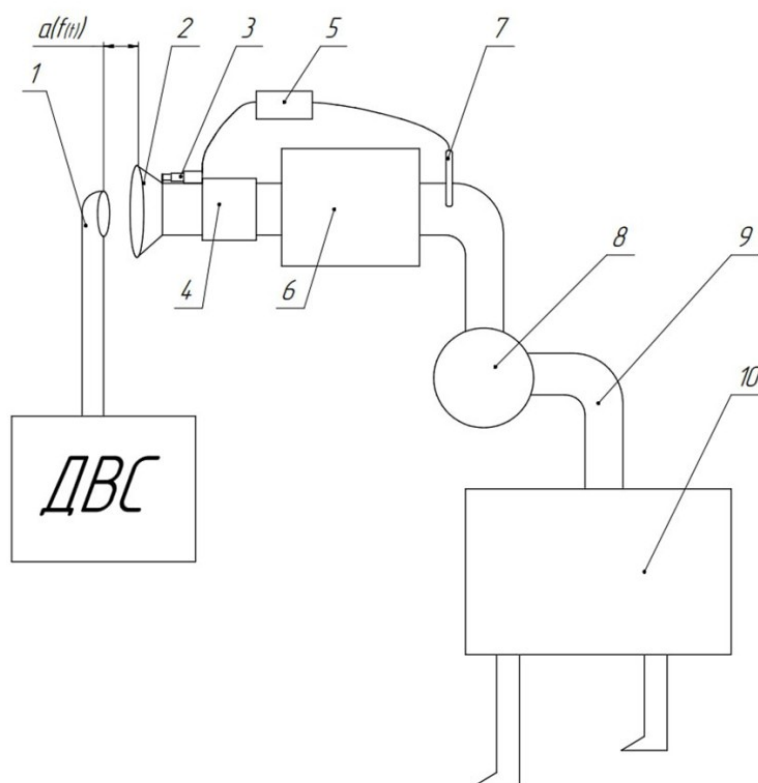


Рисунок 2 - Схема устройства охлаждения ОГ в системе их декарбонизации при работе мобильных МТА

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.66.5.3>

Примечание: 1 – выхлопная труба; 2 – газозаборный раструб; 3 – актуатор; 4 – сажеуловитель; 5 – управляющее устройство; 6 – интеркулер; 7 – температурный датчик; 8 – центробежный вентилятор; 9 – гибкие шланги; 10 – рабочие органы посадочного или почвообрабатывающего агрегата

Особенность предложенного конструктивно-технологического решения заключается в комбинировании способов подачи охлажденных отработавших газов в почву теплообменником и смешивания их с атмосферным воздухом. Охлаждение отработавших газов будет проходить с помощью теплообменника, установленного на крыше трактора и с помощью подмешивания наружного воздуха через раструб в непосредственной близости от выхлопной трубы, который в свою очередь будет оснащен актуатором, регулирующим зазор между ними.

Обсуждение

Предложенная схема устройства, используемого для декарбонизации ОГ, может адаптироваться к различным типам машин и орудий в технологии возделывания картофеля, рабочие органы которых, выполняют воздействие на верхний слой почвы и формируют рыхлую структуру со значительным объемом порового пространства [20]. При использовании почвосберегающей технологии возделывания картофеля подача ОГ в обрабатываемый слой может выполняться при посадке картофеля и при междурядной обработке пропашными культиваторами-глубокорыхлителями, оснащенными лопастными лункователями ротационного типа. Высокое качество заделки ОГ в

почву и обеспечение наиболее эффективной их декарбонизации достигается при выполнении этих операций при достижении в обрабатываемом слое состояния физической спелости, когда крошение пласта производится с минимальными усилиями по линии наименьших внутренних связей между почвенными агрегатами. Такое состояние почвы достигается при прогревании верхнего слоя до температуры более 10 °С и влажности в пределах 22–28%.

Формирование мелкокомковатой структуры почвы внутри гребня со значительным объемом крупных пор обеспечивает стабилизацию температурного режима в зоне укладки семенного материала и формирования клубней нового урожая, что способствует удержанию значительного запаса влаги за счет минимизации ее оттока в нижние горизонты корнеобитаемого слоя под действием температурного градиента. Глубокое рыхление междурядий и формирование лунок в них позволяет отводить влагу в нижние горизонты в местах ее выпадения, исключая избыточное увлажнение и заполнение крупных пор водой, что способствует более длительной экспозиции ОГ внутри гребневой поверхности. При стабильной температуре почвы и достаточном ее увлажнении обеспечиваются благоприятные условия для развития корневой системы растений, а также активной деятельности почвенной биоты, которая способна преобразовывать окислы азота NO_x в доступные для растений азотные соединения нитратной формы. Это снижает до 30% потребность во внесении азотных минеральных удобрений.

Насыщение почвенных пор углекислым газом CO_2 , находящегося в составе ОГ и создание условий для его длительного удержания внутри гребней и в междурядьях способствует более быстрому развитию листового аппарата растений и ускорению формирования клубней нового урожая. Это способствует скорейшему смыканию ботвы в междурядьях, стабилизации температурного режима в верхнем слое почвы, обеспечивая стабильное влагообеспечение корневой системы растений за счет минимизации миграции влаги в нижние горизонты корнеобитаемого слоя. Необходимо отметить, что при ширине междурядий 75 или 90 см локальное внесение ОГ в смеси с воздухом в охлажденном состоянии непосредственно в зону посадки клубней не будет существенно нарушать условия жизнедеятельности для почвенной биоты и дождевых червей по всей площади поля. При этом почвенная биота использует для своей жизнедеятельности окислы азота NO_x , а черви, обладая мобильностью могут свободно мигрировать внутри почвы.

Заключение

В результате выполненных теоретических исследований и анализа литературных источников разработана схема устройства для внесения ОГ дизельных двигателей энергетических средств, используемых при выполнении самых энергозатратных операциях при возделывании картофеля в почвосберегающих технологиях. Для обеспечения технической надежности предлагаемого устройства и безопасности ее эксплуатации предложена система управления температурным режимом воздушной смеси ОГ, подаваемой в почву. Отмечено также, что наибольший эффект декарбонизации ОГ достигается при выполнении посадки картофеля и междурядной обработки в период физической спелости почвы, когда ее температура на глубине заделки семенного материала достигает 10 °С, а влажность 22–28%. При этом посадка картофеля и его междурядная обработка выполняются синхронно с временным разрывом не более 24 часов. Соблюдение таких условий способствует стабилизации температурного и водного режима внутри гребней и в междурядьях, что обеспечивает благоприятные условия для развития растений и жизнедеятельности почвенной биоты, перерабатывающей окислы азота NO_x в доступные для растений азотные соединения. Стабильный температурный и водный почвенный режимы, а также повышенная концентрация углекислого газа CO_2 в верхнем слое почвы и активная деятельность почвенной биоты позволяют получить планируемый урожай картофеля в более краткие сроки при снижении потребности до 30% в минеральных азотных удобрениях.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.66.5.4>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.66.5.4>

Список литературы / References

1. Reicosky D. Conservation Agriculture: Global environmental benefits of soil carbon management / D. Reicosky; edited by L. Garcia-Torres, J. Benites, A. Martínez-Vilela // Conservation Agriculture – A Worldwide Challenge. — 2001. — P. 3–12.
2. Ложкин В.Н. Диагностика экологических и топливно-экономических показателей тракторных и автомобильных двигателей по дымности отработавших газов / В.Н. Ложкин, А.И. Фомичев, О.В. Ложкина // Известия Международной академии аграрного образования. — 2017. — № 35. — С. 74–79.
3. Молявко А.А. Удобрение картофеля в севооборотах / А.А. Молявко, А.В. Марухленко, Л.А. Еренкова [и др.] // Плодородие. — 2018. — № 4 (103). — С. 8–12. — DOI: 10.25680/S19948603.2018.103.03.
4. Романов А.С. Способы внесения удобрений под картофель / А.С. Романов // Современная техника и технологии. — 2017. — № 4. — URL: <https://technology.snauka.ru/2017/04/13108> (дата обращения: 16.09.2025).
5. Khan I. Exhaust Gas Fertilizer / I. Khan // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. — 2017. — Vol. 5. — Issue XII. — P. 2321–9653.
6. Шпаар Д. Картофель. Возделывание, уборка, хранение / Д. Шпаар, А. Быкин, Д. Дрегер [и др.]. — 5-е изд. — Москва : ООО ДЛВ Агродело, 2016. — 458 с.



7. Калинин А.Б. Мировые тенденции и современные технические системы для возделывания картофеля : учебное пособие для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 35.04.06 Агроинженерия / А.Б. Калинин, В.А. Ружьев, И.З. Теплинский. — Санкт-Петербург : Проспект Науки, 2016. — 160 с.
8. Чернецов Д.А. Токсичность отработавших газов дизелей и их антропогенное воздействие / Д.А. Чернецов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. — Тамбов, 2010. — № 10–12 (31). — С. 54–59.
9. Lovarelli D. Exhaust gases emissions from agricultural tractors: State of the art and future perspectives for machinery operators / D. Lovarelli, J. Bacenetti // Biosystems Engineering. — 2019. — Vol. 186. — P. 204–213. — DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.07.011.
10. Prior S. A Review of Elevated Atmospheric CO₂ Effects on Plant Growth and Water Relations: Implications for Horticulture / S. Prior, G.B. Runion, S. Marble [et al.] // HortScience. — 2011. — Vol. 46. — № 2. — P. 158–162. — DOI: 10.21273/HORTSCI.46.2.158.
11. Яковлева П.Д. Обзор систем обогащения почвенного воздуха углекислым газом при возделывании сельскохозяйственных культур / П.Д. Яковлева // «Интеллектуальный потенциал молодых ученых как драйвер развития АПК» : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся. — Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2023. — С. 393–396.
12. Kalinin A. Selection and justification of potato inter row tillage systems based on development of dynamic model of heat and moisture transfer between soil layers / A. Kalinin, V. Kalinina, I. Teplinsky [et al.] // Engineering for Rural Development. — 2020. — Vol. 19. — P. 819–825. — DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF191.
13. Калинин А.Б. Снижение экологических рисков применения мобильных энергонасыщенных агрегатов при возделывании семенного картофеля с учетом закономерности тепло и влагопереноса внутри корнеобитаемого слоя почвы / А.Б. Калинин, И.З. Теплинский, В.А. Ружьев [и др.] // Аграрный научный журнал. — 2023. — № 5. — С. 132–139. — DOI: 10.28983/asj.y2023i5pp132-139.
14. Kalinin A.B. Improving the efficiency of the soil uncompactness by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control / A.B. Kalinin, M.A. Novikov, V.A. Ruzhev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 723. — 032061 p. — DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061.
15. Калинин А.Б. Система обработки почвы в энергосберегающих технологиях / А.Б. Калинин, Ю.Н. Сидыганов // Аграрная наука. — 2004. — № 1. — С. 17–18.
16. Теплинский И.З. Минимизация факторов риска техногенного характера при производстве картофеля по интенсивной технологии / И.З. Теплинский, А.Б. Калинин, В.А. Ружьев // Научное обоснование стратегии развития АПК и сельских территорий в XXI веке : материалы Национальной научно-практической конференции. Том 1. — Волгоград : Волгоградский государственный аграрный университет, 2021. — С. 29–33.
17. Kalinin A.B. Methods and means of digital measurement of soil parameters and conditions of functioning of tillage machines for deep loosening of soil / A.B. Kalinin, I.Z. Teplinsky, V.A. Ruzhev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 659. — 012015 p. — DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012015.
18. Sauvé J.-F. Diesel Exhaust Exposure during Farming Activities: Statistical Modeling of Continuous Black Carbon Concentrations / J.-F. Sauvé, E. Stapleton, P. O'Shaughnessy [et al.] // Annals of Work Exposures and Health. — 2020. — Vol. 64. — № 5. — P. 1–15. — DOI: 10.1093/annweh/wxaa032.
19. Afsharnia F. Effects of diesel-engine exhaust emissions on seed germination and seedling growth of *Brassicaceae* family using digital image analysis / F. Afsharnia, S.A. Moosavi // Journal of Environmental Health Science and Engineering. — 2021. — Vol. 19. — № 2. — P. 1887–1900. — DOI: 10.1007/s40201-021-00742-6.
20. Аниферов Ф.Е. Справочник по настройке и регулировке сельскохозяйственных машин / Ф.Е. Аниферов, Е.И. Давидсон, П.И. Домарацкий [и др.]. — Ленинград : Колос, 1980. — 256 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Reicosky D. Conservation Agriculture: Global environmental benefits of soil carbon management / D. Reicosky; edited by L. Garcia-Torres, J. Benites, A. Martínez-Vilela // Conservation Agriculture – A Worldwide Challenge. — 2001. — P. 3–12.
2. Lozhkin V.N. Diagnostika ekologicheskikh i toplivno-ekonomicheskikh pokazatelej traktornykh i avtomobil'nykh dvigatelej po dymnosti otrabotavshikh gazov [Diagnostics, environmental and fuel-economic indicators of tractor and automobile engines, smoke exhaust] / V.N. Lozhkin, A.I. Fomichev, O.V. Lozhkina // Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya [Proceedings of the International Academy of Agricultural Education]. — 2017. — № 35. — P. 74–79. [in Russian]
3. Molyavko A.A. Udobrenie kartofelya v sevooborotakh [Application of fertilizers for potato cultivation in crop rotations] / A.A. Molyavko, A.V. Marukhlenko, L.A. Erenkova [et al.] // Plodorodie [Fertility]. — 2018. — № 4 (103). — P. 8–12. — DOI: 10.25680/S19948603.2018.103.03. [in Russian]
4. Romanov A.S. Sposoby vneseniya udobrenij pod kartofel' [Ways of application of fertilizers under potatoes] / A.S. Romanov // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii [Modern equipment and technologies]. — 2017. — № 4. — URL: <https://technology.snauka.ru/2017/04/13108> (accessed: 16.09.2025). [in Russian]
5. Khan I. Exhaust Gas Fertilizer / I. Khan // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. — 2017. — Vol. 5. — Issue XII. — P. 2321–9653.
6. Shpaar D. Kartoffel'. Vozdelyvanie, uborka, khranenie [Potatoes. Cultivation, harvesting, storage] / D. Shpaar, A. Bykin, D. Dreger [et al.]. — 5th ed. — Moscow : DLV Agrodello LLC, 2016. — 458 p. [in Russian]



7. Kalinin A.B. Mirovye tendencii i sovremennye tekhnicheskie sistemy dlya vozdel'nyaniya kartofelya [Global trends and modern technical systems for potato cultivation] : textbook for master's students in the field of study 35.04.06 Agroengineering / A.B. Kalinin, V.A. Ruzhiev, I.Z. Teplinsky. — Saint Petersburg : Prospekt Nauki, 2016. — 160 p. [in Russian]
8. Chernetsov D.A. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizelej i ikh antropogennoe vozdejstvie [Toxicity of the fulfilled gases of diesel engines and their anthropogenous effect] / D.A. Chernetsov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo [Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky University]. — Tambov, 2010. — № 10–12 (31). — P. 54–59. [in Russian]
9. Lovarelli D. Exhaust gases emissions from agricultural tractors: State of the art and future perspectives for machinery operators / D. Lovarelli, J. Bacenetti // Biosystems Engineering. — 2019. — Vol. 186. — P. 204–213. — DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.07.011.
10. Prior S. A Review of Elevated Atmospheric CO₂ Effects on Plant Growth and Water Relations: Implications for Horticulture / S. Prior, G.B. Runion, S. Marble [et al.] // HortScience. — 2011. — Vol. 46. — № 2. — P. 158–162. — DOI: 10.21273/HORTSCI.46.2.158.
11. Yakovleva P.D. Obzor sistem obogashcheniya pochvennogo vozdukhha uglekislym gazom pri vozdel'nyanii sel'skokhozyajstvennykh kul'tur [Overview of systems for enriching soil air with carbon dioxide in agricultural crop cultivation] / P.D. Yakovleva // Intel'ktual'nyj potentsial molodykh uchenykh kak drajver razvitiya APK [Intellectual potential of young scientists as a driver of agricultural development] : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students. — Saint Petersburg : Publishing House of the Saint Petersburg State Agrarian University, 2023. — P. 393–396. [in Russian]
12. Kalinin A. Selection and justification of potato inter row tillage systems based on development of dynamic model of heat and moisture transfer between soil layers / A. Kalinin, V. Kalinina, I. Teplinsky [et al.] // Engineering for Rural Development. — 2020. — Vol. 19. — P. 819–825. — DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF191.
13. Kalinin A.B. Snizhenie ekologicheskikh riskov primeneniya mobil'nykh energonasyshchennykh agregatov pri vozdel'nyanii semennogo kartofelya s uchetom zakonmernosti teplo i vlagoperenosa vnutri korneobitaemogo sloya pochvy [Reducing the environmental risks of using mobile energy-saturated units during seed potatoes growing taking into account the patterns of heat and moisture transfer within the root spreading zone in the soil] / A.B. Kalinin, I.Z. Teplinsky, V.A. Ruzhiev [et al.] // Agrarnyj nauchnyj zhurnal [Agricultural Scientific Journal]. — 2023. — № 5. — P. 132–139. — DOI: 10.28983/asj.y2023i5pp132-139. [in Russian]
14. Kalinin A.B. Improving the efficiency of the soil uncompactness by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control / A.B. Kalinin, M.A. Novikov, V.A. Ruzhev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 723. — 032061 p. — DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061.
15. Kalinin A.B. Sistema obrabotki pochvy v energosberegayushchikh tekhnologiyakh [System of soil tilling in energy-saving technologies] / A.B. Kalinin, Yu.N. Sidyganov // Agrarnaya nauka [Agricultural Science]. — 2004. — № 1. — P. 17–18. [in Russian]
16. Teplinsky I.Z. Minimizatsiya faktorov riska tekhnogennogo kharaktera pri proizvodstve kartofelya po intensivnoj tekhnologii [Minimization of technogenic risk factors in potato production using intensive technology] / I.Z. Teplinsky, A.B. Kalinin, V.A. Ruzhiev // Nauchnoe obosnovanie strategii razvitiya APK i sel'skikh territorij v XXI veke : materialy Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. Tom 1 [Scientific substantiation of the strategy for the development of the agro-industrial complex and rural areas in the XXI century : materials of the National Scientific and Practical Conference. Vol. 1]. — Volgograd : Volgograd State Agrarian University, 2021. — P. 29–33. [in Russian]
17. Kalinin A.B. Methods and means of digital measurement of soil parameters and conditions of functioning of tillage machines for deep loosening of soil / A.B. Kalinin, I.Z. Teplinsky, V.A. Ruzhev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 659. — 012015 p. — DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012015.
18. Sauvé J.-F. Diesel Exhaust Exposure during Farming Activities: Statistical Modeling of Continuous Black Carbon Concentrations / J.-F. Sauvé, E. Stapleton, P. O'Shaughnessy [et al.] // Annals of Work Exposures and Health. — 2020. — Vol. 64. — № 5. — P. 1–15. — DOI: 10.1093/annweh/wxaa032.
19. Afsharnia F. Effects of diesel-engine exhaust emissions on seed germination and seedling growth of *Brassicaceae* family using digital image analysis / F. Afsharnia, S.A. Moosavi // Journal of Environmental Health Science and Engineering. — 2021. — Vol. 19. — № 2. — P. 1887–1900. — DOI: 10.1007/s40201-021-00742-6.
20. Aniforov F.E. Spravochnik po nastrojke i regulirovke sel'skokhozyajstvennykh mashin [Handbook on the adjustment and regulation of agricultural machinery] / F.E. Aniforov, E.I. Davidson, P.I. Domaratsky [et al.]. — Leningrad : Kolos, 1980. — 256 p. [in Russian]