ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.319
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-28-37

Выбор и обоснование параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора для возделывания картофеля

А.Б. Калинин[1]✉***, И.З. Теплинский***[2]***, И.С. Немцев***[3]
[1, 2, 3] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; г. Санкт-Петербург, Россия
[1] andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758
[2] teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-4464-066X
[3] ivannemcev180997@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1786-2489

Аннотация. Фумигация почвы при возделывании картофеля позволяет защитить клубни от почвенных вредителей. Комбинированный фумигатор за один проход должен подготовить почву и внести гранулированный препарат, при этом создать условия для длительного нахождения паров фумиганта внутри обработанного слоя. Исследования проведены с целью выбора рациональных параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора, включающего в себя устройство дозирования препарата, рыхлительные лапы и активный прикатывающий каток. Фумигатор должен обеспечить сплошное крошение обрабатываемого слоя почвы на глубину до 30 см с образованием пористой структуры с твердостью не более 1 МПа и максимальную экспозицию летучих газов внутри почвы. Разработаны аналитические модели определения рациональных параметров настройки глубины хода рыхлительных лап и режима работы активного катка. Рациональный режим активного катка, обеспечивающий наибольшее уплотнение верхнего слоя почвы (0…2 см), определяли измерением крутящего момента на его валу при повышении степени буксования от 0 до 20%. Установлено, что комбинированный почвообрабатывающий агрегат при глубине обработки 35 см и скорости движения 8 км/ч обеспечил сплошное крошение почвы в корнеобитаемом слое и создал в зоне размещения гранул фумиганта пористую структуру с твердостью не более 1 МПа. Практическая проверка методики поиска рационального режима профильного активного катка по параметру крутящего момента показала, что при степени буксования катка 15% и крутящем моменте 15,6 Н/м экспозиция летучих газов внутри почвы достигла 26 мин, что на 73% больше по сравнению с нулевым значением буксования. Гипотеза об увеличении экспозиции паров фумиганта внутри корнеобитаемого слоя почвы с упрочненным поверхностным слоем подтверждена. Создание благоприятных условий для распространения паров фумиганта в зоне размещения корневой системы картофеля позволит защитить ее от различных почвенных вредителей и нематод.

Ключевые слова: картофель; фумигант; фумигатор; фумигация почвы; крошение почвы; рыхлительные лапы; активный прикатывающий каток; рациональный режим активного катка

Для цитирования: Калинин А.Б., Теплинский И.З., Немцев И.С. Выбор и обоснование параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора для возделывания картофеля // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 28-37. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-28-37

ORIGINAL ARTICLE

Design and optimization of working elements for the tillage module of a combined fumigator in potato production

A.B. Kalinin[1]✉***, I.Z. Teplinsky***[2]***, I.S. Nemtsev***[3]
[1, 2, 3] Saint Petersburg State Agrarian University; Saint Petersburg, Russia
[1] andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758
[2] teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-4464-066X
[3] ivannemcev180997@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1786-2489

Abstract. Soil fumigation in potato cultivation is an effective method for protecting tubers from soil-borne pests. A combined fumigator must perform multiple operations in a single pass – specifically, preparing the seedbed and applying granular agrochemicals – while simultaneously providing conditions for the prolonged retention of fumigant vapors within the treated soil layer. The study aimed to select and optimize rational parameters for the working

© Калинин А.Б., Теплинский И.З., Немцев И.С., 2026

elements of the tillage module of a combined fumigator, which incorporates a metering unit, loosening tines, and an active packer roller. The machine must ensure continuous crumbling of the treated soil layer to a depth of up to 30 cm, establish a porous soil structure with a penetration hardness of no more than 1 MPa, and maximize the retention time of volatile gases within the soil profile. The authors developed analytical models to determine optimal parameter settings for the working depth of the loosening tines and the operating mode of the active roller. The optimal operating mode of the active roller, which ensures maximum compaction of the topsoil layer (0-2 cm), was determined by measuring shaft torque as the slip ratio increased from 0% to 20%. Experimental results demonstrated that the combined tillage implement, operating at a tillage depth of 35 cm and a forward speed of 8 km/h, successfully provided continuous soil crumbling in the root zone and created a porous structure with a hardness of no more than 1 MPa in the fumigant placement zone. Practical validation of the methodology for determining the optimal operating mode of the profile active roller based on torque measurements revealed that at a roller slip ratio of 15% and a torque of 15.6 N · m, the retention time of volatile gases in the soil reached 26 minutes, representing a 73% increase compared to zero-slip conditions. The findings confirm the hypothesis that compacting the topsoil layer significantly extends fumigant vapor retention within the potato root zone. Establishing favorable conditions for fumigant vapor distribution in the root zone will enhance crop protection against various soil pests and nematodes.

Keywords: potato; fumigant; fumigation soil fumigation; soil crumbling; loosening tines; active packer roller; rational operation mode of the active roller

For citation: Kalinin A.B., Teplinsky I.Z., Nemtsev I.S. Design and optimization of working elements for the tillage module of a combined fumigator in potato production. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):28-37. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-28-37

Введение

Для производства картофеля предпочтительным является использование легких и средних по физико-механическим свойствам почв, однако в связи с незначительной площадью таких земель применяют укороченный севооборот. Высокая концентрация культуры на ограниченной площади приводит к ухудшению фитосанитарного состояния агроландшафтов, возникновению специфичных болезней и очагов опасных почвенных вредителей (нематод, проволочника, подкапывающих совок), паразитирующих на корнях и клубнях картофеля, что приводит к существенным потерям ввиду недобора урожая и потерям при хранении.

Одним из эффективных приемов борьбы с почвенными вредителями является обработка почвы специальными химическими препаратами фумигантного действия посредством их внесения в почву с помощью фумигаторов[1] [1]. Комбинированный фумигатор подготавливает почву, вносит гранулированные препараты фумигантного действия и создает условия для длительного нахождения паров внутри обработанного слоя. Поэтому основными требованиями к функционированию комбинированного агрегата являются точное поддержание заданной нормы внесения гранул фумиганта [2], создание рыхлой структуры почвы, позволяющей парам препарата распространяться по порам и трещинам обрабатываемого слоя почвы, а также реализация приема, способствующего увеличению экспозиции препарата.

Можно предположить, что подбор рациональной глубины хода рыхлительных лап, обеспечивающих сплошное крошение почвы на заданной глубине внесения фумиганта, и оптимальной степени буксования катка, упрочняющего поверхностный слой почвы, позволят обеспечить наиболее полное распространение паров внутри корнеобитаемого слоя и увеличить время присутствия газа в почвенном массиве, что существенно повышает эффективность фумигации.

Цель исследований: совершенствование технологического процесса функционирования комбинированного фумигатора за счет выбора рациональных параметров рабочих органов почвообрабатывающего модуля и обоснование режимов их работы.

Материалы и методы

Комбинированный фумигатор разработан в ФГБОУ ВО СПбГАУ с целью совмещения процессов подготовки почвы под посадку картофеля и выполнения фитосанитарных работ с применением препаратов фумигантного действия (рис. 1).

Почвообрабатывающий модуль агрегата состоит из рамы *1*, на которой в два ряда установлены глубокорыхлительные лапы на пружинных стойках *2* [3]. Глубокорыхлительные лапы первого ряда рыхлят почву в основании гребней, а питатели *7* фитосанитарного модуля, закрепленные на их стойках, выполняют ленточное равномерное внесение гранул фумиганта на требуемую глубину. На стойках лап *2* второго ряда закреплены окучивающие корпуса *3*.

[1] Велецкий И.Н., Лысов А.К. и др. Механизация защиты растений. М.: Агропромиздат, 1992. 222 с.

Устройство дозирования препарата фитосанитарного модуля включает в себя бункер *12*, высевающий аппарат 8 катушечного типа с приводом от электромотора *9* с настраиваемой частотой вращения посредством электронного блока *11*, датчик частоты вращения *10* и весоизмерительную[2] платформу *13*. Контроль рабочего процесса высевающего аппарата осуществляется блоком цифрового контроля *14*, на который поступают сигналы от датчиков частоты вращения *10*, скорости агрегата *15* и тензодатчиков весоизмерительной платформы. К раме *1* шарнирно присоединен адаптер управления экспозицией паров фумиганта в виде гладкого диаболического катка *4* с приводом от гидросистемы трактора. Частота вращения катка настраивается через электроуправляемый дроссель-регулятор *5*. Настройка и поддержание рационального режима работы адаптера *4* для управления экспозицией фумиганта в почве осуществляются с помощью блока цифрового управления *6*.

Условием высококачественной фумигации почвы является формирование в корнеобитаемой зоне значительного объема пор, в которых могут распространяться пары вносимого фумиганта. Наиболее эффективным приемом формирования пористого пространства внутри почвы является воздействие на нее рыхлительных лап, при котором в обрабатываемом слое возникают и развиваются опережающие трещины, расходящиеся перед рабочими органами в переднем и боковых направлениях[2] [4, 5]. Отсюда следует необходимость теоретического обоснования рациональных параметров настройки глубины хода рыхлительных лап, после прохода которых на глубине пахотного слоя (20…22 см) будет обеспечиваться сплошное крошение почвы. На основе закономерностей распространения зон деформации, предложенной проф. В.С. Жегаловым[3], и различий физико-механических свойств почвы в подпахотном (a_1), пахотном (a_2) и поверхностном (a_3) горизонтах получена

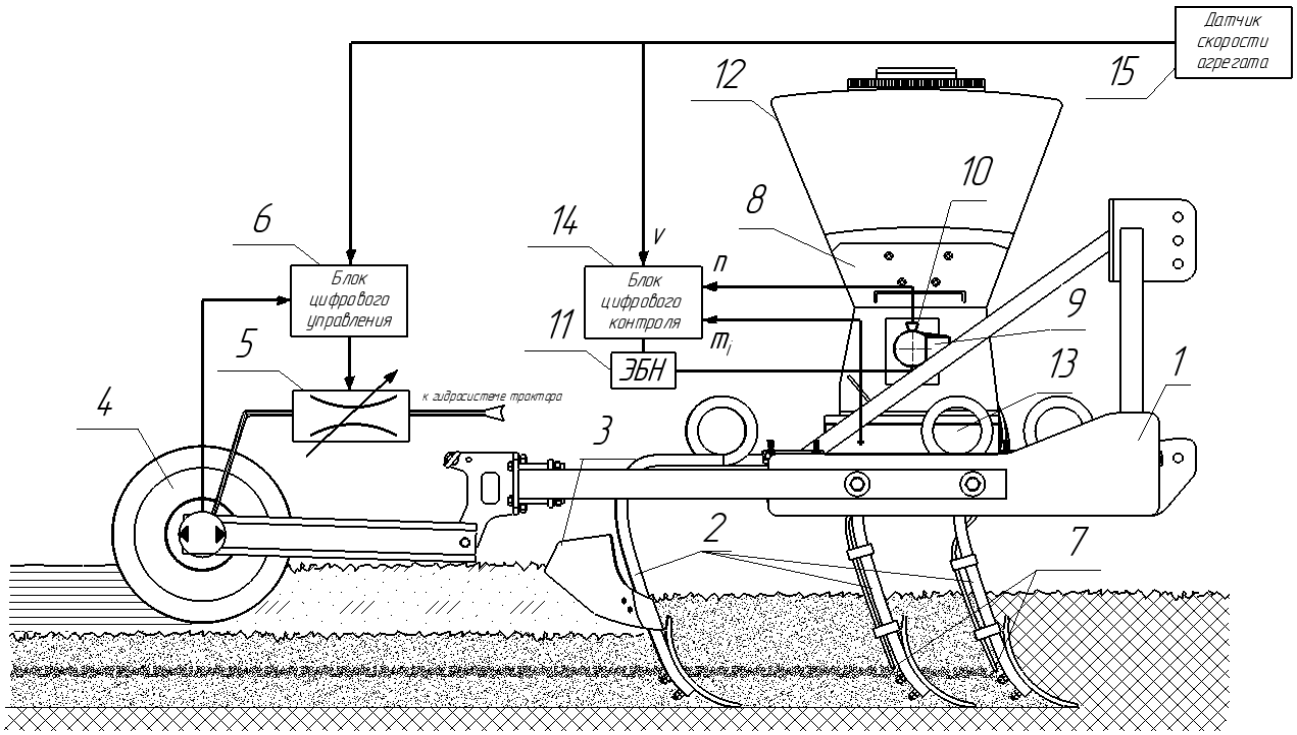


Рис. 1. Технологическая схема комбинированного фумигатора:
1 – рама; 2 – пружинные стойки; 3 – окучивающие корпуса; 4 – диаболический каток;
5 – электроуправляемый дроссель-регулятор; 6 – блок цифрового управления; 7 – питатели;
8 – высевающий аппарат; 9 – электромотор; 10 – датчик частоты вращения; 11 – электронный блок настройки;
12 – бункер; 13 – весоизмерительная платформа; 14 – блок цифрового контроля; 15 – датчик скорости агрегата

Fig. 1. Operating diagram of a combined fumigator
1 – frame; 2 – spring struts; 3 – hilling bodies; 4 – diabolic roller; 5 – electrically controlled throttle regulator;
6 – digital control unit; 7 – feeders; 8 – seeding unit; 9 – electric motor; 10 – speed sensor;
11 – electronic adjustment unit; 12 – hopper; 13 – weighing platform; 14 – digital control unit; 15 – unit speed sensor

[2] Труфанов В.В. Глубокое чизелевание почвы / Всесоюзная академия сельскохозяйственных наук имени В.И. Ленина. М.: Агропромиздат, 1989. 140 с.

[3] Кленин Н.И., Киселев С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Агроинженерия». М.: Издательство КолосС, 2008. 815 с.

математическая модель. Модель позволяет выполнять настройку глубины хода глубокорыхлительных лап комбинированного агрегата $a_н$ при известных значениях коэффициентов внутреннего и внешнего трения в горизонтах и текущих значениях влажности почвы с целью обеспечения сплошного крошения почвы на заданной глубине внесения препарата $a_{гр}$ через питательные трубки, причем $a_{гр} = a_3 + a_0$ (рис. 2).

Аналитическое выражение для определения рациональных параметров настройки глубины хода рыхлительных лап комбинированного фумигатора представлено в виде следующего выражения

$$a_н \geq \left(b - \frac{d}{2} - \frac{(a_3 + a_2 - a_{гр}) tg\psi_2}{\sin\psi_2} \right) \cdot \frac{\sin\theta_1}{tg\theta_1} + a_2 + a_3, \quad (1)$$

где b – расстояние между рыхлительными лапами; d – ширина рыхлительной лапы; a_2 – глубина пахотного горизонта; a_3 – глубина поверхностного слоя; $a_{гр}$ – глубина заделки гранул фумиганта; ψ_2 – угол распространения деформаций в пахотном горизонте; θ_1 – углом внутреннего трения «почва-почва».

Для оценки результатов рациональной настройки рабочих органов, формирующих рыхлую почвенную структуру, предложено использовать показатель твердости почвы, определяемый твердомером. С этой целью проведены измерения твердости почвы пенетрологгером, регистрирующим усилие проникновения металлического деформатора конусной формы одновременно с глубиной его погружения [6].

Для надежного удержания паров фумиганта внутри подготовленной под посадку картофеля профилированной поверхности предложено верхний слой уплотнить активным катком, функционирующим в режиме буксования. Теоретическое обоснование рационального режима работы активного катка, обеспечивающего наибольшее уплотнение верхнего слоя почвы, выполнено с учетом одного из элементов уравнения реологической модели почвенного состояния, описывающего изменение плотности почвы в зависимости от нормальных и касательных напряжений, возникающих в элементарном почвенном объеме в результате воздействия на него прикатывающего катка [7]. Данный элемент реологической модели почвы представляет собой оценку изменения исходной плотности почвы в зависимости от напряжений, возникающих в элементарном почвенном объеме[4], и описывается выражением:

$$\rho = \rho_0 + b \cdot \ln(\sigma_{ср} + c \cdot \tau_{max}), \quad (2)$$

где ρ – плотность почвы; ρ_0 – начальное значение плотности почвы; b и c – эмпирические коэффициенты; τ_{max} – предельное касательное напряжение.

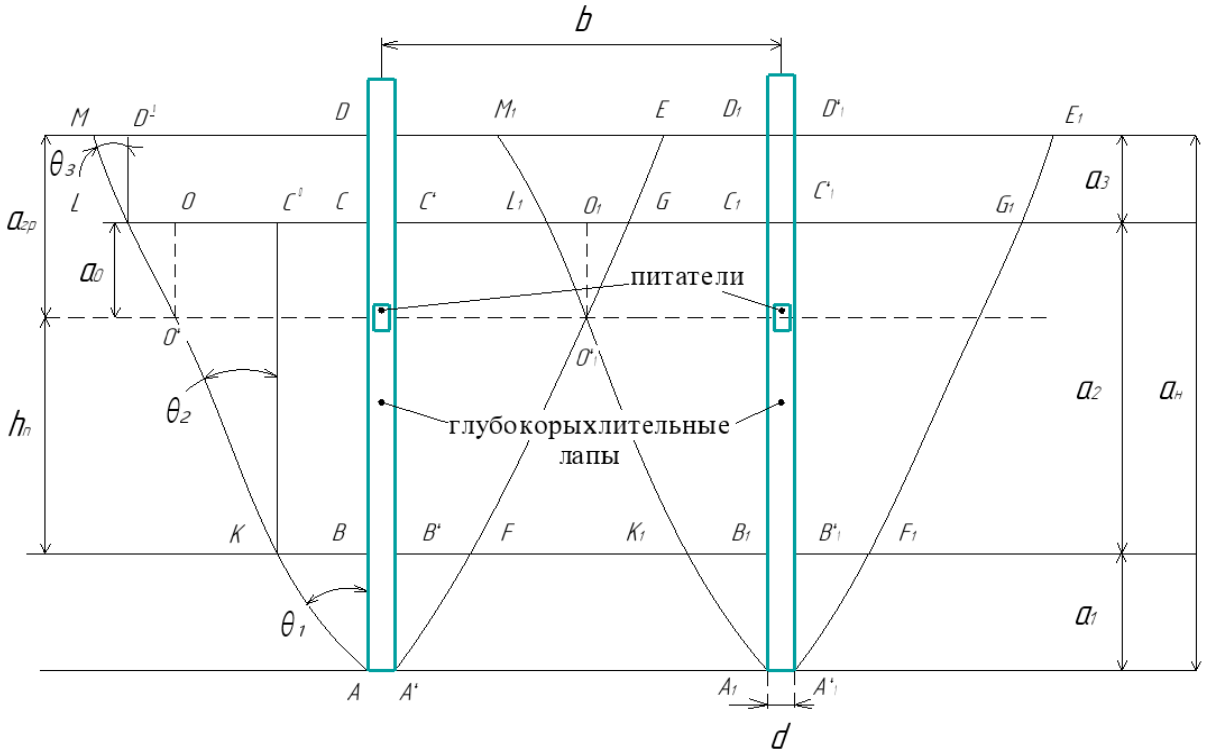


Рис. 2. Схема распространения зон деформации почвы от смежных глубокорыхлительных лап в поперечной плоскости

Fig. 2. Distribution pattern of soil deformation zones from adjacent deep-loosening tines in the transverse plane

[4] Кушнарёв А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы. Киев: Урожай, 1989. 140 с.

Анализируя выражение (2), можно заключить, что при воздействии на почву прикатывающего катка, функционирующего в режиме буксования, прирост плотности почвы происходит за счет предельных касательных напряжений, возникающих в зоне контакта катка с почвой. Это обеспечивает максимальную экспозицию паров фумиганта внутри обрабатываемого слоя. Для анализа закономерности формирования упрочненного верхнего слоя почвы активным катком рассмотрим схему, представленную на рисунке 3.

При качении активного катка по поверхности почвы с некоторой вертикальной нагрузкой Q необходимо приложить некоторый крутящий момент M к его приводному валу, чтобы обеспечить заданную степень буксования ε. В зоне контакта катка с почвой на дуге ABC вертикальная нагрузка Q и усилия на ободе катка R, возникающие при крутящем моменте M, преобразуются в распределенную нагрузку $q(\varphi)$, которая воздействует на элементарный почвенный массив на некоторой глубине z. При качении активного катка по деформируемой поверхности на дуге обода ABC, находящейся в контакте с почвой, существуют две зоны: сцепления (дуга AB), когда траектория частиц почвы, соприкасающихся с катком, совпадает с траекторией точки на поверхности катка; буксования (дуга BC), когда траектории точек на поверхности катка и прилегающих частиц почвы являются различными [8].

Согласно данным рисунка 3 нормальное напряжение в верхнем элементе почвы, возникающее от действия распределенной нагрузки в зоне сцепления AB, ограниченной сектором $(\varphi - \varphi_1)$, будет иметь вид:

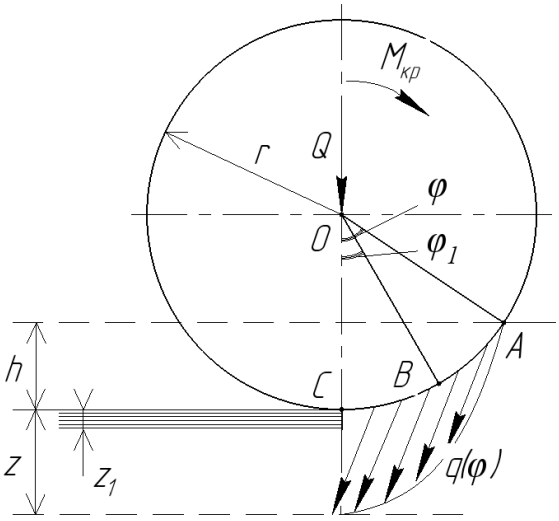


Рис. 3. Схема формирования упрочненного поверхностного слоя почвы при работе активного катка

Fig. 3. Pattern of surface soil layer consolidation during operation of an active roller

$$d\sigma = \frac{dq \cdot \cos(\varphi_1)}{dl}, \quad (3)$$

причем $dl = r \cdot d\varphi$, где r – радиус катка.

Поскольку на этом участке частицы почвы, соприкасающиеся с ободом катка, удерживаются на его поверхности за счет сил сцепления, то в поверхностном слое, соприкасающемся с катком, возникают касательные напряжения τ, которые вызывают в нем сдвиговые деформации. На этом участке обода ближе к точке B касательные напряжения τ возрастают, пока не достигнут своего предельного значения $\tau_{пр} = \tau_{max}$, определяемого по выражению:

$$\tau_{пр} = \sigma \cdot \mathrm{tg}(\Psi_{с-п}) + c_{с-п}, \quad (4)$$

где $tg(\Psi_{с-п})$ – коэффициент трения «сталь-почва»; $c_{с-п}$ – коэффициент сцепления «сталь-почва».

В точке B происходит отрыв почвенной частицы от поверхности катка и начинается их взаимное скольжение на участке BC, на котором касательные напряжения τ в поверхностном слое имеют постоянное значение, соответствующее режиму скольжения $\tau_{ск}$:

$$\tau_{ск} = \sigma \cdot \mathrm{tg}(\Psi_{с-п}). \quad (5)$$

Для нижних слоев почвы, не соприкасающихся с ободом катка, максимальные касательные напряжения в зоне сцепления и касательные напряжения в зоне буксования определяются по выражениям (4) и (5), в которые вместо коэффициентов трения $\Psi_{с-п}$ и сцепления $c_{с-п}$ «Сталь-почва» подставляются соответствующие коэффициенты $\Psi_{п-п}$ и $c_{п-п}$ «Почва-почва». Отсюда следует, что наибольшая плотность почвы $\rho_{пов}$ в поверхностном слое формируется при таком режиме работы активного катка, когда размер зоны сцепления AB имеет максимально возможную величину и существенно превышает участок BC в зоне буксования. В этом случае максимальные касательные напряжения τ_{max} на каждом участке зоны сцепления имеют значения, близкие к критическим, то есть $\tau_{max} \approx \tau_{пр}$. Отметим, что с помощью этих выражений невозможно аналитическим путем определить рациональный режим работы активного катка ввиду сложности определения коэффициентов трения и сцепления и их значительной вариабельности в реальных условиях функционирования [9]. Поэтому определение рационального режима работы активного катка комбинированного фумигатора предлагается выполнить по косвенному показателю на основе силового анализа схемы взаимодействия катка и почвы.

При работе активного катка передаваемый на его вал крутящий момент $M_{кр}$ уравновешивается

моментом, возникающим под действием равнодействующей силы R, приложенной к ободу:

$$M_{кр} = d \cdot R, \quad (6)$$

где d – расстояние от линии действия силы R до оси катка.

Равнодействующая R определяется выражением:

$$R = \sqrt{N^2 + T^2}, \quad (7)$$

где N – равнодействующая нормальных сил; T – равнодействующая касательных сил, действующих на каток со стороны почвы.

Равнодействующая касательных сил T является суммой касательных сил, возникающих в зоне буксования $T_б$ и в зоне сцепления $T_{сц}$, которые определяются как $T_б = N_б \cdot \text{tg}(\Psi_{с-п})$ и $T_{сц} = N_{сц} \cdot \text{tg}(\Psi_{с-п} + c_{с-п})$ соответственно. В этом случае максимальное значение крутящего момента $M_{кр.max}$ будет соответствовать режиму качения катка, при котором значение равнодействующей касательных сил в зоне сцепления $T_{сц}$ имеет максимально возможное значение. При увеличении частоты вращения катка при постоянной скорости движения агрегата, а следовательно, и увеличении степени его буксования, значения крутящего момента на его валу будут снижаться по причине уменьшения размера зоны действия коэффициентов сцепления «Сталь-почва» и «Почва-почва».

Определение рационального режима работы активного катка возможно путем оперативного вычисления производной $M'_{кр}(\varepsilon)$ процесса крутящего момента $M_{кр}$ по мере увеличения степени буксования ε путем увеличения его частоты вращения при постоянной скорости МТА [10]. Степень буксования ε активного катка, при которой производная $M'_{кр}(\varepsilon) = 0$ (при изменении значения с положительного на отрицательный) соответствует рациональному режиму его работы, обеспечивающему формирование наиболее плотной поверхности почвы $\rho_{пов}$, препятствующей улетучиванию фумиганта в атмосферу. В этом случае время экспозиции фумиганта в почве приминает максимальное значение T_{max}, то есть

$$M_{кр.max} \sim \rho_{пов.max} \sim T_{max}. \quad (9)$$

Для проверки теоретических исследований метода определения рационального режима работы адаптера управления экспозицией фитосанитарного модуля агрегата с помощью газоанализатора определяли время удерживания метана внутри слоя почвы после прохода комбинированного агрегата [11]. Схема проведения эксперимента с упрочненным поверхностным слоем почвы представлена на рисунке 4.

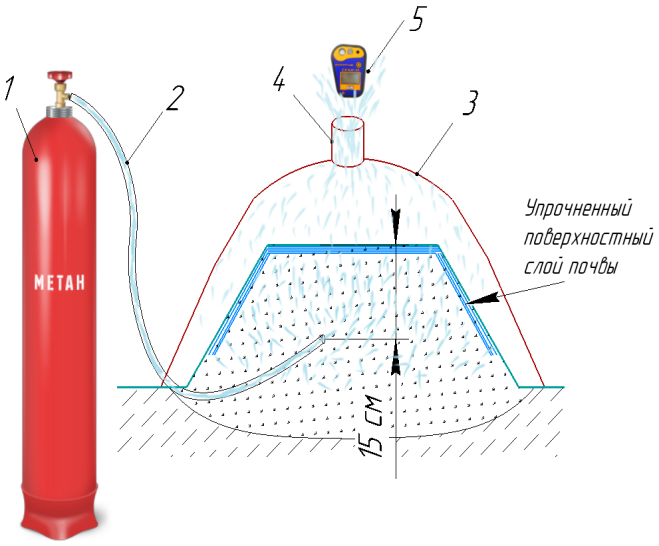


Рис. 4. Схема оценки экспозиции газа внутри почвы после прохода комбинированного фумигатора:
1 – баллон с газом; *2* – трубка*;*
3 – газонепроницаемый кожух; 4 – горловина;
5 – газоанализатор

Fig. 4. Measurement pattern of the gas leaking through the soil after the passage of a combined fumigator
1 – gas cylinder; 2 – tube; 3 – gas-tight casing;
4 – neck; 5 – gas analyzer

После прохода фумигатора в почвенный массив на глубину 15 см вводили трубку *2*, по которой из баллона *1* внутрипочвенно подавали метан. Часть гребня над трубкой была плотно закрыта газонепроницаемым кожухом *3*. Внутренняя поверхность кожуха выполнена обтекаемой, чтобы поднимающийся газ беспрепятственно перемещался в его верхнюю часть, где в сквозном отверстии горловины кожуха *4* размещен газоанализатор *5*. С подачей газа синхронно проводили измерения газоанализатором. Через 10 с подачу прекращали. Газоанализатор записывал значения концентрации до момента, пока ее значение не приблизится к нулю.

Результаты и их обсуждение

Для разрушения переуплотненного почвенного горизонта и минимизации затрат энергии на обработку почвы использовали алгоритм поиска переуплотненного горизонта путем вычисления производной процесса изменения твердости почвы R по мере увеличения глубины h [12, 13]. После определения положения переуплотненного слоя была установлена глубина обработки – 35 см. Рабочая скорость движения агрегата при такой глубине обработки составляла 8 км/ч. После измерения ординат случайного процесса глубины обработки почвы $a(l)$ получили оценки его статистических характеристик (табл. 1).

Таблица 1

Оценки статистических характеристик глубины обработки почвы рыхлительными лапами комбинированного фумигатора

Table 1

Estimates of statistical characteristics of the depth of soil cultivation by loosening tines of a combined fumigator

Случайный процесс	Статистическая характеристика	Числовая оценка статистической характеристики	Доверительный интервал
Глубина рыхления, $a(l)$	m_a, см	35,7	33,4…38,1
	$б_a$, см	2,93	2,35…4,52
	V_a, %	8,2	7,04…8,97

Анализируя данные таблицы 1, можно заключить, что настроечное значение глубины обработки почвы ($a_н$) позволяет минимизировать влияние факторов профиля поверхности поля и твердости почвы на равномерность хода орудия. Коэффициент вариации V_a, не превышающий 9%, характеризует стабильность протекания процесса глубины обработки почвы при работе комбинированного фумигатора. Доверительные интервалы оценок статистических характеристик процесса глубины обработки почвы $a(l)$ рассчитывали с 95%-ной вероятностью.

Оценку процесса твердости почвы $R_p(l)$ после ее рыхления культиватором-глубокорыхлителем выполняли в соответствии с принятой методикой экспериментальных исследований, где твердость определяли пенетрологгером, оснащенным деформатором конусного типа [14]. Угол конуса 60° соответствует воздействию на почву развивающейся корневой системы растений. По результатам выполненных измерений получили оценки статистических характеристик процесса изменения твердости почвы $R_p(l)_i$ для каждого 5-сантиметрового слоя опытного участка поля после применения орудия, настроенного на глубину $a_н$ = 35 см (табл. 2).

Анализируя данные, представленные в таблице 2, можно сказать, что комбинированный почвообрабатывающий агрегат для обеззараживания почвы полностью устранил уплотнение почвы в корнеобитаемом слое глубиной до 35 см. Математическое ожидание твердости почвы в слое до 30 см не превышает значения 1 МПа, что свидетельствует о формировании в обработанном слое рыхлой структуры с большим количеством пор и капилляров. Применив формулу М.Н. Шарова[5] для определения состояния почвы по показателям твердости почвы, измеренной конусным деформатором, установили, что она становится рыхлой и легкообрабатываемой после прохода культиватора.

Рациональный режим активного катка определяли измерением крутящего момент на его валу $M_{кр}$ при постепенном повышении степени буксования δ от 0 до 20% путем изменения частоты вращения катка при поддержании постоянной скорости движения (табл. 3).

Из данных таблицы 3 следует, что при степени буксования активного катка δ = 15% имеем максимальную плотность почвы влажностью 23% и наблюдаем максимальное значение крутящего момента на валу активного катка. На основании данных таблицы 3 построены графики изменения плотности почвы ρ и крутящего момента на валу активного катка в зависимости от степени буксования δ (рис. 5).

Отметим, что крутящий момент на валу катка и плотность почвы в поверхностном слое почвы растут с увеличением степени буксования от 5 до 15%. При дальнейшем увеличении до 20% отмечается некоторое снижение плотности верхнего слоя почвы, что объясняется уменьшением зоны сцепления на его ободе.

Таблица 2

Оценки статистических характеристик процесса изменения твердости почвы $R_p(l)_i$ после прохода комбинированного почвообрабатывающего агрегата для обеззараживания почвы

Table 2

Estimates of statistical characteristics of the processes of change in cone index $R_p(l)i$ after passing a combined soil-cultivating unit for soil disinfection

Статистические характеристики	Глубина слоя, см													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
m_{Rp}, МПа	0,6	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	2,6	3,7	4,8	4,0	3,1	2,3	2,5	3,3
$σ_{Rp}$, МПа	0,17	0,24	0,18	0,19	0,16	0,22	0,73	0,89	1,01	0,76	0,71	0,55	0,5	0,73
V_{Rp}, %	28	30	25	27	23	31	28	24	21	19	23	24	20	22

[5] Шаров Н.М. Эксплуатационные свойства машинно-тракторных агрегатов. М.: Колос, 1981. 240 с.

Таблица 3

Оценки статистических характеристик крутящего момента $M_{кр}$ и плотности почвы $\rho_{пов}(l)$ в слое 0…2 см в зависимости от степени буксования активного катка δ

Table 3

Estimates of the statistical characteristics of the torque $M_{кр}$ and soil density ρ(l) in the 0-2 cm layer depending on the degree of slippage of the active roller δ

Степень буксования катка δ, %	Крутящий момент на валу активного катка $m_{M_{кр}}$, Н/м	Оценки статистических характеристик процесса плотности почвы $\rho_{пов}$ (*l*) в слое 0…2 см		
		m_ρ, г/см³	σ_ρ, г/см³	V_ρ, %
0	8,2	1,12	0,07	6,3
5	10,4	1,08	0,06	5,6
10	13,3	1,15	0,07	6,1
15	15,21	1,26	0,07	5,6
20	14,36	1,20	0,14	6,7

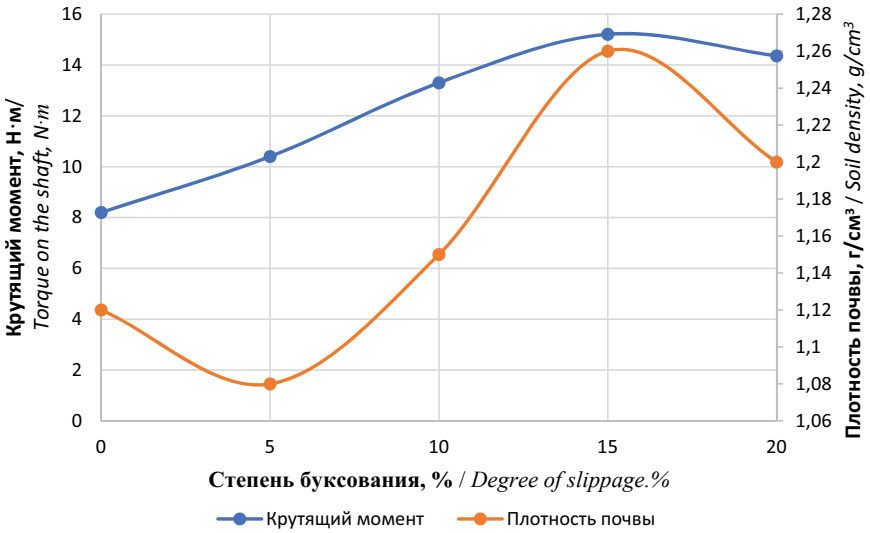


Рис. 5. Изменение средних значений плотности почвы m_ρ в слое 0…2 см и крутящего момента на валу активного катка $m_{M_{кр}}$ в зависимости от степени буксования δ

Fig. 5. Change in average values of soil density m_ρ in the 0-2 cm layer and torque on the shaft of the active roller $m_{M_{кр}}$ depending on the degree of slippage δ

С целью подтверждения гипотезы об увеличении экспозиции паров фумиганта внутри корнеобитаемого слоя почвы с упрочненным поверхностным слоем провели измерение времени присутствия легкого газа в почвенном массиве в зависимости от уровня упрочнения поверхностного слоя почвы, соответствующего различным настроечным значениям степени буксования катка δ. Время экспозиции метана $T_{эксп}$ определяли до момента, когда концентрация метана на выходе из отверстия кожуха снижалась до нуля. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 4.

Проведенные исследования показали, что максимальная экспозиция паров газов (26 мин) внутри обрабатываемого слоя наблюдается при степени буксования 15% и максимальном крутящем моменте на валу катка 15,6 Н/м.

Таблица 4

Оценка времени экспозиции газов в зависимости от уровня упрочнения поверхностного слоя почвы при различных значениях степени буксования активного катка δ

Table 4

Estimate of gas exposure time as a function of the degree of soil surface layer compaction for various values of the active roller slip ratio δ

Степень буксования катка δ, %	Крутящий момент на валу активного катка $m_{M_{кр}}$, Н/м	Экспозиция паров в слое 4…10 см, мин
0	8,9	15
5	10,2	19
10	13,5	22
15	15,6	26
20	14,7	24

Выводы

1. Рациональная расстановка рыхлительных лап почвообрабатывающего модуля комбинированного фумигатора, выполненная с учетом неоднородности почвенных горизонтов по глубине обработки и изменения физико-механических свойств почвы, позволила в зоне размещения гранул фумиганта создать пористую структуру корнеобитаемого слоя, твердость которого на глубине 30 см не превышает 1 МПа. Создание благоприятных условий для распространения паров фумиганта в зоне размещения основной массы корневой системы картофеля позволяет защитить ее от различных почвенных вредителей и нематод.

2. Методика определения рационального режима работы активного катка по показателю максимального значения крутящего момента на валу привода позволила установить, что наиболее плотная поверхность гребней почвы влажностью 23% формируется при 15%-ном буксовании. При этом время экспозиции летучих газов внутри почвы составило 26 мин, что на 73% больше по сравнению с нулевым значением буксования.

Список источников

1. Bukłaha A., Wieczorek A. et al. New trends in application of the fumigation method in medical and non-medical fields. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*: *AAEM*. 2021;29(2):185-189. https://doi.org/110.26444/aaem/144136

2. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Смелик В.А. и др. Совершенствование методов мониторинга качества работы дозирующих систем машин химизации // Аграрный научный журнал. 2022. № 6. С. 94-98. https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp94-98

3. Калинин А.Б., Теплинский И.З., Шпиганович П.М. Методы и средства управления режимами влагообеспечения в технологии возделывания оригинальных семян картофеля в условиях глобального изменения климата // Аграрный научный журнал. 2023. № 4. С. 112-118. https://doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp112-118

4. Мударисов С.Г. Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27-30. EDN: ROJUVN

5. Рахимов Р.С., Рахимов З.С., Рахимов И.Р., Рахимжанов А.Р. Обоснование конструктивной схемы и тягового сопротивления чизельных орудий с одновременным внесением минеральных удобрений // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 111-119. https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-57-1-111-119

6. Киреев И.М., Коваль З.М. Измерительное средство для определения сопротивления почвы при погружении в нее плунжеров с наконечниками // АгроФорум. 2019. № 6. С. 54-57. EDN: EWHTBA

7. Ружьев В.А., Калинин А.Б., Теплинский И.З. и др. Совершенствование рабочих органов машин и орудий для обработки почвы на основе реологической модели почвенного состояния // Аграрный научный журнал. 2024. № 11. С. 163-174. https://doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp163-174

8. Бородянский В.П. Сопротивление качению жесткого колеса по упруго-пластичному основанию // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. № 1. С. 91-94. EDN: JWRMZJ

9. Almuaythir S., Zaini M.S.I., Lodhi R.H. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study. Scientific Reports. 2025;15:24018. https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2

10. Смелик О.В. Результаты экспериментальных исследований активного катка в составе комбинированного ботвоуборочного агрегата // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 36. С. 206-211. EDN: UXKRSB

11. Шарков И.Н. Методика количественного определения дыхания почвы в полевых условиях // Почвы и окружающая среда. 2025. Т. 8, № 3. https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334

Reference

1. Bukłaha A., Wieczorek A., Majewski P. et al. New trends in application of the fumigation method in medical and non-medical fields. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*: *AAEM*. 2021;29(2):185-189. https://doi.org/10.26444/aaem/144136

2. Kalinin A.B., Teplinsky I.Z., Smelik V.A. et al. Improving the quality control methods for the functioning of dosing systems of chemicalization machines. *Agrarian Scientific Journal.* 2022;6:94-98. (In Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp94-98

3. Kalinin A.B., Teplinsky I.Z., Shpiganovich P.M. Methods and means for managing moisture supply regimes during original potato seed growing in the context of global climate change. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;4:112-118. (In Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp112-118

4. Mudarisov S.G. Modeling the interaction of working tools with soil. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2005;7:27-30. (In Russ.).

5. Rakhimov R.S., Rakhimov Z.S., Rakhimov I.R., Rakhimzhanov A.R. Justification of the constructive scheme and traction resistance of chisel tools with the simultaneous application of mineral fertilizers. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2021;1:111-119. (in Russ.) https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-57-1-111-119

6. Kireev I.M., Koval Z.M. Measuring instrument for determining soil resistance when immersing plungers with tips into it. *AgroForum*. 2019;6:54-57. (in Russ.).

7. Ruzhev V.A., Kalinin A.B., Teplinsky I.Z. et al. Improvement of working bodies of machines and tools for soil cultivation based on a rheological model of the soil state. *Agrarian Scientific Journal*. 2024;11:163-174. (in Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp163-174

8. Borodyansky V.P. Rolling resistance of a rigid wheel on an elastic-plastic base. *Izvestiya Vuzov*. *Food technology*. 2008;1:91-94. (in Russ.).

9. Almuaythir S., Zaini M.S.I., Lodhi R.H. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study. *Scientific Reports*. 2025;15:24018. https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2

10. Smelik O.V. Results of experimental studies of the active rollers as part of the rink in the combined unit remover topper. *Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University*. 2014;36:206-211. (in Russ.).

11. Sharkov I.N. Methodology of quantitative determination of soil respiration in field conditions. *The Journal of Soils and Environment*. 2025;8(3): e334. https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.334

12. Teplinsky I.Z., Kalinin A.B. Algorithm for adjusting chisel plows for operating depth. *Tractors and Agricultural Machinery.* 1997;2:22-24. (in Russ.).

12. Теплинский И.З., Калинин А.Б. Алгоритм настройки чизельных плугов на глубину обработки // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1997. № 2. С. 22-24. EDN: TRTPTP

13. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture. 2021;723(3):032061. https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032061

14. Левшин А.Г., Ерохин М.Н. Научно-методические основы формирования нормированной шкалы твердости почвы // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2017. № 6 (82). С. 28-34. EDN: ZWKXWH

13. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture. 2021;723(3):032061. https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032061

14. Levshin A.G., Erokhin M.N. Scientific and methodical grounds to make normalized scale of soil hardness. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2017;6:28-34. (In Russ.)

Сведения об авторах

[1] **Калинин Андрей Борисович,** д-р техн. наук; andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758; SPIN-код: 6759-2761
[2] **Теплинский Игорь Зиновьевич,** канд. техн. наук, профессор; teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4464-066X; SPIN-код: 5967-8078
[3] **Немцев Иван Сергеевич,** старший преподаватель; ivannemcev180997@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1786-2489; SPIN-код: 6776-1692
[1, 2, 3] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; 196601, г. Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, 2

Author Information

Andrei B. Kalinin[1], DSc (Eng); andrkalinin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-6301-5758
Igor Z. Teplinsky[2], CSc (Eng), Professor; teplinskij.igor.zinovevich@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4464-066X
Ivan S. Nemtsev[3], Senior Lecturer; ivannemcev180997@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1786-2489
[1, 2, 3] Saint Petersburg State Agrarian University; 2, Petersburgskoe Highway, St. Petersburg, Pushkin, 196601, Russian Federation

Вклад авторов

Калинин А.Б. – руководство исследованиями, создание окончательной версии статьи;
Теплинский И.З. – концептуализация и редактирование рукописи;
Немцев И.С. – получение и обработка данных, визуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Author Contribution

A.B. Kalinin – research supervision, wring – review and editing of the manuscript;
I.Z. Teplinsky – conceptualization; wring – review and editing of the manuscript;
I.S. Nemtsev – data curation, visualization.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Статья поступила 23.04.2026, после рецензирования и доработки 13.05.2026, принята к публикации 09.06.2026

Received 23.04.2026; Revised 13.05.2026; Accepted 09.06.2026