

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.51

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-17-26>

Моделирование воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы

Я.П. Лобачевский¹, С.И. Старовойтов²¹ Федеральный научный агрогинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия² Брянский государственный аграрный университет; с. Кокино, Брянская обл., Россия¹ lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>² starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

Аннотация. Перспективным видом воздействия на почву является рыхление ее сжатым воздухом. Технология рыхления почвы сжатым воздухом предусматривает два режима: воздействие на поверхностный слой ультразвуковых колебаний и без сверхвысокочастотного воздействия. Исследования проведены с целью определения степени интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой почвы. Интенсивность воздействия сжатого воздуха на почву оценивалась такими показателями, как коэффициент рыхления, форма сечения области рыхления, глубина рыхления, максимальная ширина области рыхления, ширина зоны входа воздушной струи в почву. Для оценки интенсивности воздействия сжатого воздуха на почву применен метод конечных элементов, когда почва как объект обработки представлена модулем упругости первого рода, коэффициентом Пуассона, величиной удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц. Метод конечных элементов реализован в программе Labview в интервале физической спелости почвы 16...23% при сбросе давления ресивера 0,2...0,5 МПа. Экспериментальными исследованиями установлен факт различия сечений внутренней области рыхления в зависимости от режима обработки. С ростом сброса давления ресивера для всех значений абсолютной влажности суглинистой почвы характерно увеличение коэффициента и глубины рыхления, а также максимальной ширины сечения области рыхления. В диапазоне абсолютной влажности почвы 16...23% и давления сброса ресивера 0,2...0,5 МПа максимальная глубина рыхления суглинистой почвы сжатым воздухом составила 5 см. При этом максимальная ширина сечения области рыхления почвы варьировалась с 2 до 5 см, а ширина зоны входа воздушной струи в почву соответствовала 2...3 см. Максимальное значение коэффициента рыхления 17% достигнуто при абсолютной влажности 16% и давлении сброса ресивера 0,5 МПа. Полученные результаты исследований будут способствовать эффективной расстановке газоструйных излучателей без внедрения деформатора.

Ключевые слова: почва; рыхление; влажность почвы; сжатый воздух; коэффициент рыхления; форма сечения области рыхления; глубина рыхления; максимальная ширина области рыхления; ширина зоны входа воздушной струи в почву

Для цитирования: Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Моделирование воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы // Агрогинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 17-26. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-17-26>

ORIGINAL ARTICLE

Modeling the impact of compressed air on the surface layer of loamy soil

Y.P. Lobachevsky¹, S.I. Starovoitov²¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia² Bryansk State Agrarian University; Bryansk, Russia¹ lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>² starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

Abstract. Soil loosening with compressed air is a promising technique. This technology offers two modes: surface layer treatment with and without ultrasonic vibration. The study aimed to quantify the impact intensity of compressed air jets on the soil surface. To assess intensity, the author used the following indicators: loosening coefficient, loosening area cross-section shape, loosening depth, maximum loosening area width, and the zone width of an air jet entry. The finite element method (FEM) was employed to model soil response to treatment, using parameters such as Young's modulus, Poisson's ratio, and the specific potential energy of soil particle destruction.

This FEM analysis was implemented in LabVIEW software, simulating soil at its physical ripeness (16-23% moisture content) under receiver pressure drops of 0.2-0.5 MPa. Experiments revealed that inner loosening area sections varied based on the treatment mode (with or without ultrasonic vibration). Increasing receiver pressure consistently increased the loosening coefficient, loosening depth, and maximum loosening area width across all moisture content levels of the loamy soil tested. Within the specified moisture and pressure ranges (16-23% moisture, 0.2 to 0.5 MPa), the maximum loosening depth achieved was 5 cm, the maximum loosening width ranged from 2 to 5 cm, and the air jet entry zone width was 2 to 3 cm. A maximum loosening coefficient of 17% was observed at 16% moisture content and 0.5 MPa receiver discharge pressure. These findings will help determine the optimal placement of gas jet emitters in future designs, potentially eliminating the need for a deformer.

Keywords: soil; loosening; soil moisture; compressed air; loosening coefficient; loosening area cross-section shape; loosening depth; maximum loosening area width; and the zone width of an air jet entry

For citation: Lobachevsky Y.P., Starovoitov S.I. Modeling the impact of compressed air on the surface layer of loamy soil. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):17-26 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-17-26>

Введение

Обработка почвы при возделывании и уборке сельскохозяйственных культур – наиболее трудоемкая и энергоемкая операция, на выполнение которой тратится около 40% энергетических и 35% трудовых затрат от всего комплекса полевых работ¹.

Снижение энергоемкости при воздействии на почву является актуальной задачей² [1-3]. К перспективным видам воздействия на почву относится ее рыхление сжатым воздухом [4-10]. Так, использование сжатого воздуха для рыхления поверхностного слоя почвы при реализации полосовой обработки позволило осуществить объемное рыхление без внедрения механического деформатора [11].

Для удержания влаги на глубине от 3 до 10 см можно с помощью сжатого воздуха проводить осенне-поверхностное рыхление по стерне и весеннее рыхление верхнего слоя почвы.

В настоящее время совершенствование почвообрабатывающих орудий базируется на классических аналитических методах расчета и проектирования машин, что заметно усложняет и затягивает процесс их внедрения в производство.

Реализация цифровых двойников технологических процессов с использованием современных компьютерных технологий инженерного проектирования и расчета является важной и актуальной задачей. Модели обработки почвы в зависимости от численной реализации подразделяются на модели с использованием метода вычислительной гидродинамики, дискретных и конечных элементов.

¹ Бурченко П.Н. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения: Монография. М.: ВИМ, 2002. 212 с.

² Ториков В.Е., Мельникова О.В. Научные основы агрономии: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 348 с.

Методы вычислительной гидродинамики для задач почвообработки в России первыми начали использовать В.С. Казаков³, А.П. Иофинов⁴, С.Г. Мударисов [12, 13]. С.Г. Мударисовым установлено, что величины давлений и, как следствие, силы и моменты, действующие на рабочие органы почвообрабатывающих машин, зависят от вязкости моделируемой среды. Это обстоятельство предполагает использование метода вычислительной гидродинамики для почв, абсолютная влажность которых находится выше верхнего предела физической спелости.

Метод дискретных элементов имитирует механическое поведение системы, состоящей уже из набора «твёрдых частиц» произвольной формы при их взаимодействии с деформаторами. С учетом состояния объекта и условий его нагружения применяются различного рода модели контакта для описания нормальных и тангенциальных сил, адгезии и когезии взаимодействующих частиц. Реализация данного метода показала его эффективность только при использовании эквивалентных, искусственно полученных физико-механических характеристик обрабатываемой среды.

Метод конечных элементов (МКЭ) имеет право на существование, а почва как объект обработки представляется сплошной деформируемой квазиоднородной средой⁵. Линейно-упругая мо-

³ Казаков В.С. Гидромеханическое подобие потоков жидкости // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 3. С. 22-25.

⁴ Иофинов А.П., Вахитов Н.У., Лоренц С.В. Возможности гидродинамической гипотезы обработки почвы // Совершенствование конструкций и методов повышения работоспособности сельскохозяйственной техники: Сборник научных трудов / ГОСАГРОПРОМ СССР, Ульяновский сельскохозяйственный институт. Уфа; Ульяновск, 1989. С. 30-34. EDN: VDJKHT.

⁵ Кущнарев А.С. Механико-технологические основы обработки почвы. Киев: Урожай, 1989. 144 с.

дель является наиболее простой для моделирования поведения почвы, находящейся в состоянии физической спелости, однако и она не будет учитывать критические характеристики поведения почвы.

В настоящее время для описания поведения почвы под нагрузкой используются «полуэмпирические методы», сочетающие в себе, в частности, метод конечных элементов и экспериментально полученное значение удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц [14]. Последний показатель является экспериментальной величиной, характеризующей почву определенного гранулометрического состава и влажности.

Наиболее простейшей и надежной технической системой является почвообрабатывающее орудие, у которого рабочий орган скользит по поверхности почвы и характер воздействия сжатого воздуха является постоянным. Интенсивность воздействия струи будет зависеть от объемного расхода и скорости истечения сжатого воздуха, скорости движения агрегата.

Моделирование воздействия сжатого воздуха на почву с помощью полуэмпирического метода, сочетающего в себе МКЭ и показатель удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц, позволит качественно оценить интенсивность деформаций поверхностного слоя почвы.

Цель исследований: определение степени интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой почвы.

Материалы и методы

Фрагмент поверхностного слоя суглинистой почвы, на который оказывает воздействие воздушный поток, представлен на рисунке 1.

Фрагмент поверхностного слоя почвы включает в себя равнобедренные прямоугольные треугольники, связанные между собой узловыми точками. Принятая длина катета составляет 0,01 м. Это связано с тем, что исследователи⁶ за оптимальное крошение принимают такое, при котором пласт имеет 50% комков диаметром 1...10 мм и 50% комков диаметром 10...50 мм. Принято допущение: сжатый воздух оказывает воздействие только на шестую узловую точку. Вектор перемещений всех 66 узловых точек обозначается следующим образом:

$$\bar{Z} = [u_1, v_1, \dots, u_{66}, v_{66}]^T, \quad (1)$$

где u_i и v_i – перемещения узловых точек по горизонтали и вертикали, м.

Взаимосвязь всех элементов представлена в виде выражения:

$$A \cdot A^T \cdot B^{-1} \cdot \bar{Z} = \bar{P}, \quad (2)$$

где $A \cdot A^T \cdot B^{-1}$ – глобальная матрица жесткости, Н/м²; \bar{Z} – вектор перемещений узловых точек, м; \bar{P} – вектор нагрузки, действующей на узловые точки, Н.

Усилие, приходящееся на шестую узловую точку, определяется с помощью уравнения:

$$P_i = \sigma \cdot F, \quad (3)$$

где P_i – усилие, приложенное к узловой точке, Н; σ – давление в ресивере, Па; F – площадь сечения струи воздушного потока, м².

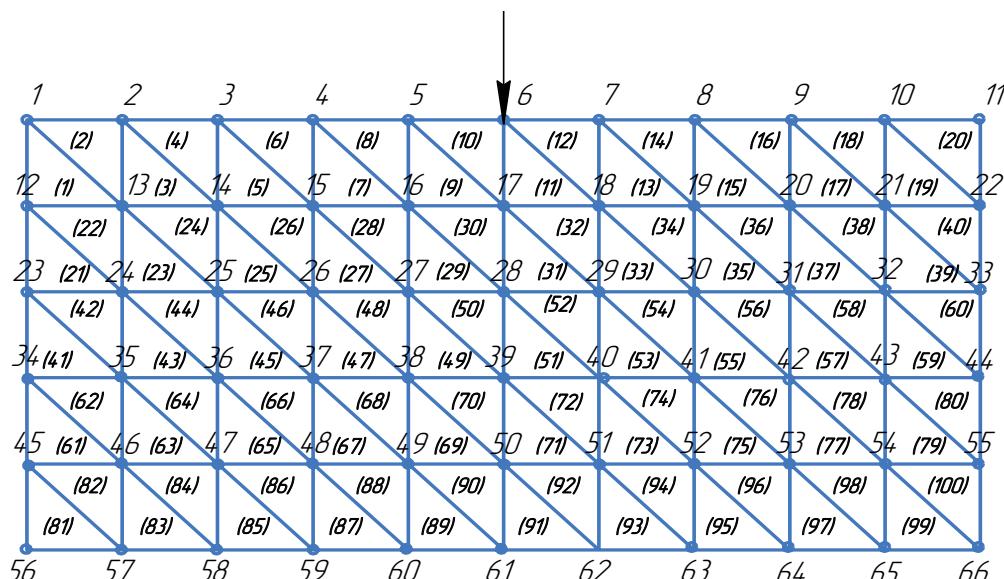


Рис. 1. Фрагмент поверхностного слоя суглинистой почвы, на который оказывает воздействие сжатый воздух

Fig. 1. Fragment of the surface layer of loamy soil affected by the compressed air

⁶Саакян Д.Н. Система показателей комплексной оценки мобильных агрегатов. М.: Агропромиздат, 1988. 144 с

Для вычисления вектора усилий $\bar{r}_i = [r_{u1}, r_{v1}, r_{u2}, r_{v2}, r_{u3}, r_{v3}]$ каждого элемента воспользуемся уравнением:

$$\bar{r}_i = a \cdot b^{-1} \cdot a^T \cdot \begin{bmatrix} u_{1i} \\ v_{1i} \\ u_{2i} \\ v_{2i} \\ u_{3i} \\ v_{3i} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $a \cdot a^T \cdot b^{-1}$ – местная матрица жесткости, Н/м.

Параметр a представляет собой матрицу, связывающую вектор независимых сил $s = [r_{u2}, r_{u3}, r_{v3}]$ со всеми силами r :

$$a = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -\beta & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где β – отношение катетов прямоугольного треугольника.

Для равнобедренного прямоугольного треугольника $\beta = 1$.

Матрица b^{-1} имеет вид:

$$b^{-1} = \frac{E \cdot \delta}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \begin{bmatrix} 6 \cdot \beta & 0 & 6 \cdot \mu \\ 0 & 3 \cdot (1 - \mu) \cdot \beta^{-1} & 0 \\ 6 \cdot \mu & 0 & 6 \cdot \beta^{-1} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости почвы первого рода, Н/м²; μ – коэффициент Пуассона почвы; δ – толщина равнобедренного прямоугольного элемента, м ($\delta = 0,01$ м).

Модуль упругости почвы первого рода E и коэффициент Пуассона μ отражают почву определенного гранулометрического состава и абсолютной влажности.

Нормальные и касательные напряжения в почвенных фрагментах определяются через независимые силы следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \sigma_\delta \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\delta \cdot d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{c \cdot \delta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{c \cdot \delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{u2} \\ r_{u3} \\ r_{v3} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где d, c – длина катета прямоугольного элемента, м; r_{u2}, r_{u3}, r_{v3} – независимые силы, действующие на равнобедренный прямоугольный элемент, Н.

Минимальные и максимальные напряжения определяются с помощью следующих выражений:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (9)$$

Удельная потенциальная энергия, накопленная элементарными почвенными фрагментами, –

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2}. \quad (10)$$

Для моделирования процесса крошения почвы разработана компьютерная программа на языке Labview, включающая в себя три этапа. На первом этапе формируются местная матрица жесткости элементарного фрагмента, глобальная матрица жесткости массива поверхностного слоя почвы, грузовой столбец. На втором этапе происходит решение кластера линейных уравнений. Третий этап направлен на определение накопленной удельной потенциальной энергии элементарными почвенными фрагментами. На рисунке 2 отображен фрагмент данной программы.

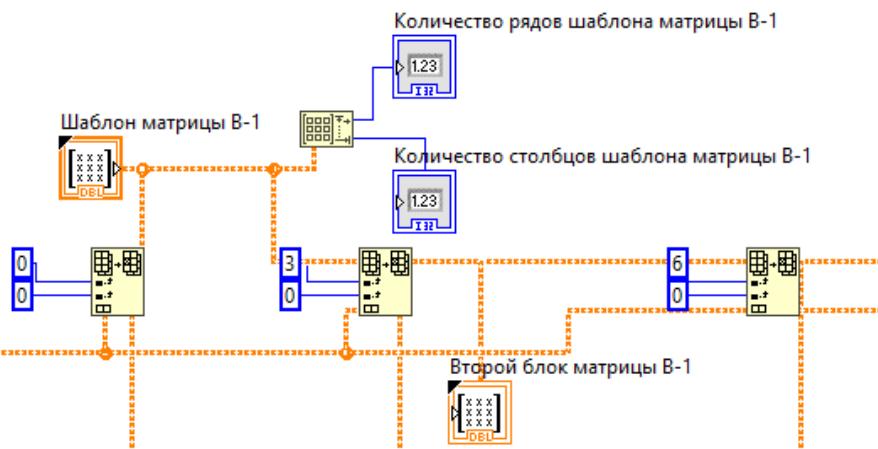


Рис. 2. Фрагмент программы, моделирующей крошение почвы

Fig. 2. Fragment of the model that simulates the crumbling of the surface soil layer

Физико-технологические параметры суглинистой почвы^{7,8} приведены в таблице 1 [15, 16]. План проведения численного эксперимента отражен в таблице 2.

Результаты моделирования, в частности, опыта № 26, при абсолютной влажности суглинистой почвы 18% и давлении сброса ресивера 0,3 МПа представлены на рисунке 3. Результат опыта № 26 является частным случаем, случайным образом выбранным, совокупного результата моделирования.

К показателям, оценивающим интенсивность воздействия воздушного потока, относятся коэффициент рыхления, форма сечения области рыхления, глубина, максимальная ширина области рыхления, ширина зоны входа воздушной струи в почву.

Коэффициент рыхления определяется выражением:

$$K_p = \frac{N_u}{N} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где K_p – коэффициент рыхления, %; N_u – количество частиц, у которых величина удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц

превышает допустимое значение (выделены красным цветом на рисунке 3); N – количество всех частиц ($N = 100$).

Технология рыхления почвы сжатым воздухом предусматривает его воздействие на поверхностный слой как в режиме ультразвуковых колебаний, так и без него [17]. Показатель «Глубина рыхления» при исключении режима ультразвуковых колебаний сжатого воздуха оценивает кинетическую энергию струи воздушного потока и реакцию среды.

В результате предварительных экспериментальных исследований воздействия сжатого воздуха на почву как в режиме ультразвуковых колебаний, так и без него, установлен факт различия сечений области рыхления (рис. 4).

Область, подвергшаяся воздействию струи воздушного потока, приобретает цилиндроидальную (колоннообразную) форму с постоянной по глубине обработки шириной сечения.

При подаче сжатого воздуха в почву в режиме ультразвуковых колебаний агрессивность потока проявляется уже в момент входа воздушного потока в поверхностный слой.

Таблица 1

Физико-технологические параметры суглинистой почвы*

Table 1

Values of physical and technological parameters of loamy soil*

Абсолютная влажность почвы, ω , %	Модуль упругости первого рода, Е, Па	Коэффициент Пуассона, μ	Величина удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц, u , Дж/м ³
16	4312795	0,472	7643
17	4249778	0,468	7492
18	4090765	0,46	7439
19	3835756	0,448	7483
20	3484751	0,432	7625
21	3037750	0,412	7864
22	2494753	0,388	8201
23	1855760	0,36	8636

*В пределах одного образца свойства почвы постоянны / Within a single sample, soil properties are constant.

⁷Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению модуля упругости почвы // Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина. 2011. № 1. С. 39-41. EDN: RASSXD.

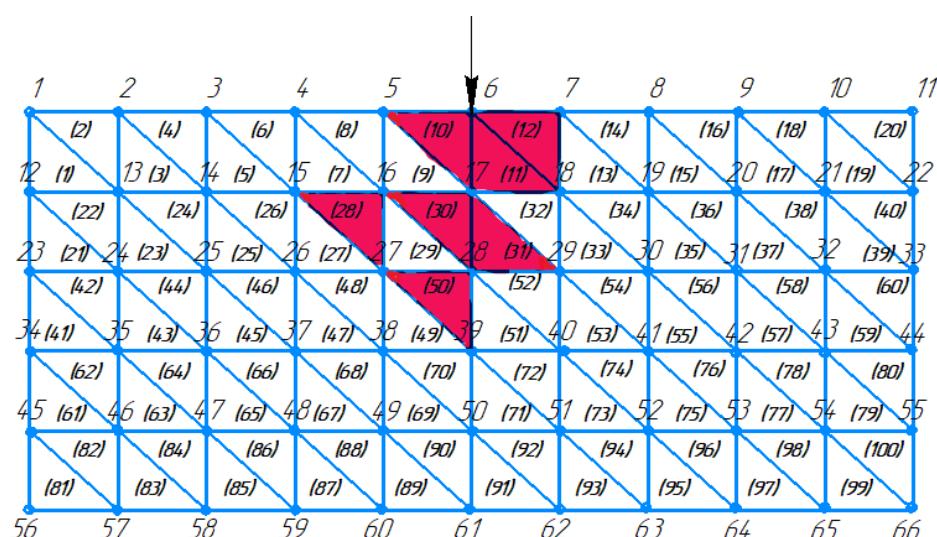
⁸Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению коэффициента Пуассона среднесуглинистой почвы // Инновационные процессы в АПК: Сборник статей IV Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов (Москва, 11-13 апреля 2012 г.). URL: <https://www.researchgate.net/profile/Ofem-Ujong/publication/287992587> (дата обращения: 26.01.2024)

Таблица 2
План численного эксперимента

Table 2

Design of a numerical experiment

Номер опыта	Абсолютная влажность почвы, ω , %	Давление сброса ресивера, МПа	Номер опыта	Абсолютная влажность почвы, ω , %	Давление сброса ресивера, МПа
1	16	0,2	17	20	0,2
2		0,3	18		0,3
3		0,4	19		0,4
4		0,5	20		0,5
5	17	0,2	21	21	0,2
6		0,3	22		0,3
7		0,4	23		0,4
8		0,5	24		0,5
9	18	0,2	25	22	0,2
10		0,3	26		0,3
11		0,4	27		0,4
12		0,5	28		0,5
13	19	0,2	29	23	0,2
14		0,3	30		0,3
15		0,4	31		0,4
16		0,5	32		0,5



Результаты обработки:

Коэффициент рыхления – 7%
Форма сечения области рыхления – колоннообразная
Глубина рыхления – 3 см
Максимальная ширина сечения области рыхления – 3 см
Ширина зоны входа воздушной струи в почву – 2 см

Рис. 3. Напряженное состояние почвенных фрагментов при давлении сброса ресивера 0,3 МПа и абсолютной влажности суглинистой почвы 18%

Fig. 3. Stress state of soil fragments at a receiver discharge pressure of 0.3 MPa and an absolute moisture content of 18% of loamy soil fragments



Рис. 4. Слепки области деформации при воздействии на почву сжатого воздуха в режиме ультразвуковых колебаний (а) и без него (б)

Fig. 4. Casts of the deformation area under the influence of compressed air on the soil in the mode of ultrasonic vibrations (a) and without it (b)

Форма тела разрушения соответствует усеченному конусу, повернутому большим основанием к дневной поверхности [17].

Такие показатели, как ширина зоны входа воздушной струи в почву, максимальная ширина области рыхления, форма сечения области рыхления, влияют на шаг расстановки газоструйных излучателей, обеспечивающих поверхностное рыхление почвы без внедрения деформатора.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой почвы отражены в таблице 3.

Для всех значений абсолютной влажности суглинистой почвы характерно увеличение коэффициента и глубины рыхления, максимальной ширины сечения области рыхления при увеличении сброса давления ресивера.

Максимальные значения параметров достигаются при сбросе давления ресивера 0,5 МПа. Минимальное значение коэффициента рыхления 3% реализуемо при абсолютной влажности почвы 22% и сбросе давления ресивера 0,2 МПа. Максимальное значение коэффициента рыхления 17% достижимо при абсолютной влажности 16% и сбросе давления ресивера 0,5 МПа. В большей мере это связано с охрупчиванием почвенного пласта при снижении влаги ближе к нижнему пределу физической сплошности почвы. Повышение величины абсолютной влажности способствует созданию амортизирующей подушки.

Глубина рыхления суглинистой почвы влажностью 16...23% при сбросе давления ресивера в диапазоне 0,2...0,5 МПа изменяется в интервале 2...5 см. Максимальное значение глубины рыхления 5 см достижимо для всех значений абсолютной влажности при сбросе давления ресивера 0,5 МПа (рис. 5), а также при влажности 17 и 18% и сбросе давления ресивера 0,4 МПа. В исследовании [11] максимальная

глубина рыхления 5 см была достигнута при абсолютной влажности 22% и сбросе давления ресивера 0,35 МПа.

Максимальная ширина сечения области рыхления суглинистой почвы в исследуемых диапазонах влажности и сбросе давления ресивера изменяется в интервале 2...5 см. Максимальное значение ширины сечения области рыхления, равное 5 см, достижимо при абсолютной влажности 17, 18 и 19% и сбросе давления ресивера 0,5 МПа. В то же время в интервале абсолютной влажности 17...18% при сбросе давления ресивера 0,4 МПа можно достичь максимальной глубины рыхления 5 см и максимального значения ширины сечения области рыхления 4 см при максимально возможной величине 5 см.

Ширина зоны входа воздушной струи в почву находится в интервале 2...3 см. Ширина входа воздушной струи в почву, равная 3 см, в большей мере характерна для грушевидной области рыхления. Минимальное значение характерно для величины сброса давления ресивера 0,2 и 0,3 МПа, а максимальное – для 0,4 и 0,5 МПа. Повышение абсолютной влажности обрабатываемой почвы и величины сброса давления ресивера не приводит к увеличению ширины зоны входа воздушной струи в почву – данный показатель является нейтральным. Возможно, данный показатель будет востребован при ультразвуковом воздействии сжатого воздуха на почву.

Грушевидная форма связана с тем, что энергии струи уже недостаточно для рыхления на большей глубине, но достаточно, чтобы смещаться в сторону. На наш взгляд, грушевидная прерывистая форма является избыточной, трудно прогнозируемой, нецелесообразной.

В дальнейших экспериментальных исследованиях планируется изучить влияние величины абсолютной влажности, степени задерненности поверхностного слоя и величины сброса давления ресивера на характер области рыхления.

Таблица 3

Результаты исследований интенсивности воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы

Table 3

Research results on the intensity of compressed air jet impact on the surface layer of loamy soil

Величина абсолютной влажности суглинистой почвы, %	Давление сброса ресивера, МПа	Коэффициент рыхления, %	Глубина рыхления, см	Максимальная ширина сечения области рыхления, см	Ширина зоны входа воздушной струи в почву, см	Форма области рыхления
16	0,2	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	6	3	2	2	Колоннообразная
	0,4	9	3	4	3	Грушевидная
	0,5	17	5	4	3	Грушевидная
17	0,2	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	6	3	2	2	Колоннообразная
	0,4	11	5	4	3	Колоннообразная
	0,5	14	5	5	3	Грушевидная
18	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	7	3	3	2	Колоннообразная
	0,4	11	5	4	3	Грушевидная
	0,5	13	5	5	3	Грушевидная
19	0,2	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	7	3	3	2	Колоннообразная
	0,4	10	3	4	3	Грушевидная
	0,5	14	5	5	3	Грушевидная
20	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	10	3	4	3	Грушевидная
	0,5	14	5	4	3	Грушевидная
21	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	9	3	3	3	Грушевидная
	0,5	13	5	4	3	Грушевидная прерывистая
22	0,2	3	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	9	3	4	3	Грушевидная
	0,5	11	5	4	3	Грушевидная прерывистая
23	0,2	4	2	2	2	Колоннообразная
	0,3	5	2	2	2	Колоннообразная
	0,4	8	3	3	3	Грушевидная
	0,5	11	5	4	3	Грушевидная прерывистая



Рис. 5. Показатели качества воздействия воздушного потока на почву абсолютной влажности 16...23% при давлении сброса ресивера 0,5 МПа

Fig. 5. Airflow impact quality indicators on soil at a moisture content of 16-23% and a receiver discharge pressure of 0.5 MPa

Выводы

1. Интенсивность воздействия сжатого воздуха на почву можно оценить с помощью коэффициента рыхления, формы сечения области рыхления, глубины рыхления, максимальной ширины области рыхления, ширины зоны входа воздушной струи в почву.

2. При абсолютной влажности суглинистой почвы 16...23% и давлении сброса ресивера 0,2...0,5 МПа максимальная глубина рыхления почвы сжатым воздухом составила 5 см.

3. Максимальное значение коэффициента рыхления достигается при абсолютной влажности 16% и давлении сброса ресивера 0,5 МПа.

4. Внутренняя область рыхления поверхностного слоя может принимать разнообразную сложную форму: симметричную или асимметричную грушевидную, или колоннообразную область рыхления.

5. Для суглинистой почвы с абсолютной влажностью 17...18% целесообразно работать в режиме сброса давления ресивера 0,4 МПа.

Список источников

- Лобачевский Я.П., Сизов О.А., Ахалая Б.Х. Ресурсосберегающий и экологически эффективный способ сохранения плодородия почвы в ротации севооборота // Научно-инновационная деятельность в агропромышленном комплексе: Сборник научных статей 6-й Международной научно-практической конференции, г. Минск, 11-12 июня 2014 г. Минск: БГАТУ, 2014. С. 174-179. EDN: UCWFPZ
- Мазитов Н.К., Рахимов Р.С., Лобачевский Я.П. и др. Влаго- и энергосберегающая технология обработки и посева в острозасушливых условиях // Техника и оборудование для села. 2013. № 3. С. 2-6. EDN: PWVYJN
- Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 3 (32). С. 94-100. EDN: YLWHAL
- Разливопредотвращатель нефтепродуктов: Патент РФ на изобретение № 94009414/26 / А.В. Бакулин; опубл. 10.04.1996; Бюл. № 1. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU94009414A1_19960410.pdf (дата обращения: 25.01.2024)
- Способ обработки, аэрации и удобрения почвы и устройство для его осуществления: Патент RU2608728 С / В.А. Плотников, А.В. Гостев, Л.В. Нитченко; опубл. 23.01.2017; Бюл. № 3. EDN: EISCTQ
- Способ повышения эффективности посевых сельскохозяйственных работ (варианты): Патент RU2536877 С2 / С.В. Бриндюк; опубл. 27.12.2014; Бюл. № 38. EDN: PLXTIF
- Агротехнический комплекс: Патент RU2087087 С1 / Н.И. Бурангулов, Г.В. Золототрубов, А.И. Плугин; опубл. 20.08.1997; Бюл. № 3. EDN: TGGFIZ
- Почвообрабатывающий агрегат для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом: Патент RU183739 U1 / А.Ю. Измайлов, Я.П. Лобачевский, Б.Х. Ахалая, Ю.Х. Шогенов; опубл. 02.10.2018; Бюл. № 28. EDN: XCOUEW
- Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Коротких Н.А. Проблемы и перспективы разработки и освоения технологии No-Till

References

- Lobachevsky Y.P., Sizov O.A., Akhalaya B.H. Resource-saving and environmentally effective way to preserve soil fertility in rotation of crop rotation. *Nauchno-innovatsionnaya deyatelost v agropromyshlennom komplekse: Proceeding of the 6th International scientific and practical conference*: June 11-12, 2014; Minsk. (In Russ.).
- Mazitov N.K., Rakhimov R.S., Lobachevsky Ya.P. et al. Moisture and energy-saving technology of soil cultivation and sowing in strongly arid conditions. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2013;3:2-6. (In Russ.)
- Mazitov N.K., Shogenov Yu.H., Tsench Yu.S. Agricultural machinery: solutions and prospects. *Vestnik VIESKh*. 2018;3(32):94-100. (In Russ.)
- Bakulin A.V. Oil Product Preventer: Patent RUS No.94009414/ 10.04.1996. Bul. No.1. Available from: https://patents.s3.yandex.net/RU94009414A1_19960410.pdf. (In Russ.)
- Plotnikov V.A., Gostev A.V., Nitchenko L.V. Method of soil treatment, aeration and fertilization and device for its implementation: Patent RUS No.2608728. 23.01.2017. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU2608728C2_20170123?ysclid=lrs02zefg570910872. (In Russ.)
- Brindyuk S.V. Method for increasing efficiency of sowing agricultural works: Patent RUS No.2536877. 27.12.2017. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU2536877C2_20141227?ysclid=lrsnwt0n5214460268. (In Russ.)
- Burangulov N.I., Zolototrubov G.V., Plugin A.I. Agrotechnical complex: Patent RUS No.2087087. 10.03.1997. Available from: <https://www.freepatent.ru/patents/2087087?ysclid=lru02gihg5779606983>. (In Russ.)
- Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Y.P., Akhalaya B.H., Shogenov Yu.H. Tillage unit for soil tillage with pulsating compressed air: Patent RUS No.183739. 02.10.2018. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU183739U1_20181002?ysclid=lru0cvkc9n794128477. (In Russ.)

на черноземах лесостепи Западной Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 9. С. 16-19. EDN: RCLTOB

10. Способ снижения тягового сопротивления плуга и повышения качества пахоты тяжелых почв: Патент SU209867 A1 / А.Т. Буряков, Н.А. Уфиркин; опубл. 26.01.1968; Бюл. № 5. EDN: ОРУНОВ

11. Старовойтов С.И., Гринь А.М., Ахалая Б.Х. и др. Об интенсивности воздействия сжатого воздуха на поверхностный слой суглинистой почвы // Современные тенденции развития аграрной науки: Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, г. Брянск, 2023 г. С. 14-20. EDN: VKHOKT

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

13. Мударисов С.Г. Моделирование воздействия рабочих органов на почву // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2005. № 5. С. 8-11. EDN: ZCGZFB

14. Дорохов А.С., Ерохин М.Н., Сибирев А.В., Мосяков М.А. Энергия разрушения почвенных комков сепарирующими рабочими органами в зависимости от физико-механических свойств почвы // Агрономия. 2024. Т. 26, № 4. С. 4-12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>

15. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Теоретические и технологические аспекты работы рыхлительного рабочего органа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 5. С. 17-23. EDN: WYKCKL

16. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П., Чемисов Н.Н. О крошении суглинистой почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 30-34. EDN: SIWANX

17. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П. Интенсивность воздействия газоструйного излучателя на поверхностный слой суглинистой почвы: результаты исследований // Агрономия. 2024. Т. 26, № 4. С. 13-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-13-18>

9. Vlasenko A.N., Vlasenko N.G., Korotkikh N.A. Problems and prospects of development and exploitation of no-till technology on chernozem of forest-steppe of Western Siberia. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2013;9:16-19. (in Russ).

10. Buryakov A.T., Ufirkin N.A. Method of reducing the traction resistance of a plow and improving the quality of plowing heavy soils: Patent USSR No. 209867. 26.01.1968. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/SU209867A1_19680126?ysclid=lrulco58m8369096043. (In Russ.)

11. Starovoitov S.I., Grin A.M., Akhalaya B.H., Starovoitova N.P., Belyaeva N.I. On the intensity of compressed air influence on the surface layer of loamy soil. *Sovremennye tendentsii razvitiya agrarnoy nauki: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*. Bryansk. 2023;14-20. (In Russ.)

12. Mudarisov S.G. Modeling the process of interaction of working bodies with the soil. *Traktory i selskokhozyaystvennye mashiny*. 2005;7:27-30. (In Russ.)

13. Mudarisov S.G. Modeling the impact of working bodies on the soil. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2005;5:8-11. (In Russ.)

14. Dorokhov A.S., Erokhin M.N., Sibirev A.V., Mosyakov M.A. Energy of soil clod crushing with a separating working tool, depending on physical and mechanical properties of the soil. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(4):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-4-12>

15. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Theoretical and technological aspects of ripper working tools operation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016;5:17-23. (In Russ.)

16. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P., Chemisov N.N. On the crumbling of loamy soil. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;3:32-36. (In Russ.)

17. Starovoitov S.I., Starovoitova N.P. Intensity of the impact made by a gas-jet emitter on the surface layer of the loamy soil: research results. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(4):13-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-13-18>

Информация об авторах

¹ Яков Петрович Лобачевский, доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник отдела почвообрабатывающих машин, Федеральный научный агронженерный центр ВИМ; 109428, Российской Федерации, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5; lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>; SPIN-код: 6097-6246

² Старовойтов Сергей Иванович, д-р техн. наук, доцент кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве, Брянский государственный аграрный университет; 243365, Российской Федерации, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 2а; starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>; SPIN:3535-6905

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Статья поступила 25.04.2025, после рецензирования и доработки 04.10.2025; принятая к публикации 06.10.2025

Author Information

Yakov P. Lobachevsky¹, DSc (Eng), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Research Engineer of the Department of Tillage Machines; Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation; lobachevsky@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>

Sergei I. Starovoitov², DSc (Eng), Associate Professor, the Department of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction; Bryansk State Agrarian University; Russian Federation, Bryansk Region, Vygonichi district, 243365, Kokino, Sovetskaya Str., 2a; starovoitov.si@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

Conflict of interests

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

Received 25.04.2025; Revised 04.10.2025; Accepted 06.10.2025