

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.31:631.312.024:631.51.014

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>

Обработка почвы с подачей сжатого воздуха – путь к быстрому восстановлению структуры почвы

А.Ю. Измайлов¹, А.С. Дорохов², И.Р. Рахимов³, Н.В. Алдошин^{4✉}, Д.А. Ялалетдинов⁵^{1,2,4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия³ Южно-Уральский государственный аграрный университет; г. Троицк, Челябинская область, Россия⁵ ООО «Челябинский компрессорный завод»; Челябинская область, Россия¹ vim@vim.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>² dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>³ ildarr@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>⁴ naldoshin@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>⁵ den@chkz.ru

Аннотация. Многократное воздействие ходовых систем тяжелых машин в технологии возделывания сельскохозяйственных культур ведет к переуплотнению почвы и увеличению ее твердости, и как следствие – к увеличению тягового сопротивления. Можно ожидать, что использование сжатого воздуха в комбинации с классическими рабочими органами почвообрабатывающих машин позволит уменьшить трение почвы о рабочие органы машин, увеличить вспушиваемость обрабатываемого слоя и расширить зоны деформации обрабатываемых участков. Цель исследований – разработать способ обработки почвы с подачей сжатого воздуха к рабочим органам почвообрабатывающих машин, обеспечивающий снижение тягового сопротивления и восстановление структуры почвы. Сжатый воздух обеспечивает деформацию и рыхление почвы методом отрыва слоя почвы без его сжатия и смятия, после чего рабочие органы машин контактируют с уже разрыхленной средой. Для проверки теоретических предположений проведена обработка почвы с подачей сжатого воздуха машинно-тракторным агрегатом, состоящим из трактора, винтовой компрессорной установки КВ-5/10, чизельного орудия с разработанными рабочими органами и системы подачи пульсирующего сжатого воздуха. Экспериментально подтвердили эффективность применения сжатого воздуха при обработке почвы орудиями с чизельными рабочими органами и установленными наконечниками для подачи воздуха диаметром 3 и 5 мм: при давлении 0,9...1,1 МПа и частоте импульсов 10 Гц улучшается устойчивость хода чизельных рабочих органов по глубине обработки, повышается крошение почвы и увеличивается глубина и ширина зоны рыхления почвы на 30...90%, при этом снижается тяговое сопротивление до 33% и увеличивается производительность на 12...68%. В дальнейшем необходимо обосновать технологические параметры, режимы работы и диаметр наконечника для различных видов обработки почвы и почвенно-климатических условий; можно интегрировать систему дифференцированного впрыска жидких удобрений и привод винтового блока компрессора от вала отбора мощности трактора.

Ключевые слова: обработка почвы; обработка почвы с подачей сжатого воздуха; сжатый воздух; чизельный рабочий орган; винтовой компрессор; рыхление почвы; крошение почвы; вспушиваемость

Для цитирования: Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Рахимов И.Р., Алдошин Н.В., Ялалетдинов Д.А. Обработка почвы с подачей сжатого воздуха – путь к быстрому восстановлению структуры почвы // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 4-13. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>

ORIGINAL ARTICLE

Soil treatment with compressed air as a way to restore the soil structure

A.Yu. Izmaylov¹, A.S. Dorokhov², I.R. Rakhimov³, N.V. Aldoshin⁴✉, D.A. Yalaletdinov⁵^{1,2,4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia³ South Ural State Agrarian University; Troitsk, Chelyabinsk Region, Russia⁵ Chelyabinsk Compressor Plant; Chelyabinsk Region, Russia¹ vim@vim.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>² dorokhov.vim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>³ ildarr@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>⁴ naldoshin@yandex.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>⁵ den@chkz.ru

Abstract. Repeated impact of the running gear systems of heavy machines employed in agriculture leads to soil compaction and increased soil hardness, which consequently results in higher traction resistance. The use of compressed air in combination with traditional working tools of soil tillage machines is expected to reduce soil friction against the machine's working tools, increase the looseness of the treated layer, and expand the deformation zones of the cultivated areas. The research aims to develop a soil treatment method that supplies compressed air to the working tools of soil tillage machines, ensuring a reduction in traction resistance and the restoration of soil structure. Compressed air induces soil deformation and loosening by detaching a soil layer without compressing or crushing it, after which the machine's working tools contact the already loosened medium. To verify the theoretical assumptions, the authors performed soil treatment operations using a machine-tractor unit consisting of a tractor, a KV-5/10 screw compressor unit, a chisel cultivator with specially designed working tools, and a pulsating compressed air supply system. Experimental results confirmed the effectiveness of using compressed air in soil tillage operations by means of chisel working tools and air supply nozzles with diameters of 3 and 5 mm. At a pressure of 0.9 to 1.1 MPa and a pulse frequency of 10 Hz, the chisel working tools demonstrated improved stability as to the depth of operation; soil crushing increased, and the depth and width of the loosening zone expanded by 30 to 90%. At the same time, traction resistance decreased by up to 33%, and productivity increased by 12 to 68%. Further research should focus on justifying technological parameters, operational modes, and nozzle diameters for various tillage operations and soil-climatic conditions. Additionally, it is possible to integrate a system for differential liquid fertilizer injection and a drive for the screw compressor unit from the tractor's power take-off shaft.

Keywords: soil tillage; soil treatment with compressed air; compressed air; chisel working tool; screw compressor; soil loosening; soil crushing; looseness of soil

For citation: Izmaylov A. Yu., Dorokhov A. S., Rakhimov I. R., Aldoshin N. V., Yalaletdinov D. A. Soil treatment with compressed air as a way to restore the soil structure. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):4-13 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>

Введение

Развитие научно-технического прогресса в сельскохозяйственном производстве направлено на разработку и совершенствование технологии возделывания сельскохозяйственных культур, способов обработки почвы и посева, создание новых рабочих органов машин, способствующих снижению их тягового сопротивления, улучшающих структуру и плодородие почв [1-4].

Применение мощной тяжелой колесной техники (тракторы, комбайны, сельскохозяйственные машины для выполнения различных технологических операций, транспортные средства) приводит к переуплотнению почв. В зависимости от применяемой технологии возделывания сельскохозяйственных культур большая часть пашни подвергается ежегодно

3...10-кратному воздействию ходовых систем тяжелых машин, что ведет к переуплотнению почвы до 1,4...1,8 г/см³. Оптимальная плотность для большинства культур на суглинистых и глинистых почвах составляет 1,1...1,3 г/см³ [5-7]. Увеличение плотности почвы ведет к возрастанию ее твердости, вызывающей увеличение тягового сопротивления в зависимости от количества проходов агрегата на 16...90%, ухудшает условия развития корневой системы растений и снижает урожайность возделываемых культур. Кроме того, снижается водопроницаемость переуплотненной почвы, что ведет к смыву ее верхнего слоя при ливневых дождях и таянии снега [8-10].

Обработка почвы является одной из наиболее энергоемких операций при возделывании сельскохозяйственных культур, поэтому необходимо

решать задачу энергосбережения за счет снижения тягового сопротивления почвообрабатывающих орудий [11-14], разрабатывать новые, эффективные способы обработки почвы, которые за один проход почвообрабатывающего агрегата обеспечат восстановление структуры почвы в соответствии с агротехническими требованиями до оптимального уровня. Задача эта может решаться различными способами.

Известно, что при обработке почвы, чтобы обеспечить ее крошение за счет напряжений сжатия, необходимо приложить значительно большие усилия, чем при действии растягивающих напряжений. Поэтому создание рабочих органов почвообрабатывающих машин, работающих при воздействии на обрабатываемую почву, за счет растягивающих напряжений даст значительное сокращение энергозатрат. К сожалению, подавляющее большинство таких попыток не удалось реализовать в конкретных конструкциях машин.

Иной путь энергосбережения – это уменьшение трения почвы о рабочие органы почвообрабатывающих машин. Достичь этого можно использованием альтернативных металлу материалов – например, полимеров. К сожалению, пока нет эффективных технологий нанесения полимерных материалов на металлические поверхности рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Также возможным направлением решения поставленной задачи является использование сжатого воздуха. При этом использование струи сжатого воздуха в виде почвообрабатывающего рабочего органа является нерациональным, так как трудно обеспечить глубокое проникновение струи воздуха в почвенный горизонт, обрабатываемая площадь минимальна, а утечки воздуха значительны. В связи с этим целесообразно использовать сжатый воздух в комбинации с классическими рабочими органами почвообрабатывающих машин. Это позволит уменьшить трение почвы о рабочие органы машин, расширить зоны деформации обрабатываемых участков, увеличить всплываемость обрабатываемого слоя. Однако для таких машин необходимо иметь высокопроизводительное компрессорное оборудование, позволяющее обеспечивать сжатым воздухом полноразмерные высокопроизводительные почвообрабатывающие агрегаты.

Цель исследований: разработать способ обработки почвы с подачей сжатого воздуха к рабочим органам почвообрабатывающих машин, обеспечивающий снижение тягового сопротивления и восстановление структуры почвы.

Материалы и методы

В технологиях возделывания сельскохозяйственных культур для основной и дополнительной

обработок почвы без оборота пласта применяются чизельные рыхлительные рабочие органы, воздействующие на почву двугранным клином¹ [1, 4].

Действие клина выражается в двух последовательно чередующихся фазах. Первая фаза – сжатие и резание клином частиц почвы при его перемещении, их подъем из положения a в положение a' (рис. 1а) [6]. Вторая фаза наступает при достижении предельной величины сжатия, обусловленной прочностью почвы, и тогда происходит разрушение, излом или отрыв пласта, направление трещины при этом может быть различным в зависимости от типа и физико-механических свойств почвы. Далее этот процесс повторяется.

В зависимости от типа и свойств почвы характер деформации под действием клина имеет различные формы (рис. 1). Сухие, твердые и уплотненные почвы деформируются отрывом кусками неправильной формы, захватывая при этом дно борозды и делая его неровным (рис. 1а). Влажные, вязкие и задернелые почвы под воздействием клина отрываются и поступают на рабочую поверхность клина изгибом (рис. 1б). Малосвязные сыпучие почвы при перемещении клина распадаются на отдельные частицы и сгуживаются перед клином (рис. 1в).

Таким образом, клин рабочего органа в процессе перемещения деформирует почву наиболее энергоемким методом сжатия, смятия с дальнейшим отрывом пласта от монолита, расходуя силу тяги трактора на преодоление возникающих при этом нормальных сил и сил трения [6].

В процессе перемещения орудия массой m (кг) со скоростью V_a (м/с) клин шириной d (м) обрабатывает почву с удельным сопротивлением K_{Π} (кН/м²) на глубину a (м) и рыхлит почву на уровне поверхности поля на ширину b (м). Тогда согласно формуле академика В.П. Горячкина тяговое сопротивление рабочего органа P (кН), определяется по формуле²:

$$P = mgf + K_{\Pi} a \frac{b+d}{2} + \varepsilon a \frac{b+d}{2} V_a^2, \quad (1)$$

где f – коэффициент, характеризующий силы трения на протаскивание орудия в открытой борозде; ε – скоростной коэффициент, характеризующий форму поверхности рабочего органа и свойства почвы, кНс²/м⁴.

Использование сжатого воздуха при обработке почвы является перспективным и новым способом,

¹ Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика. М.: Агропромиздат, 1986. 349 с.; Мазитов Н.К. Российская техника и технология производства продукции здорового жизнеобеспечения. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2019. 260 с.

² Горячкин В.П. Собрание сочинений: В 3 т. М.: Машиностроение, 1967.

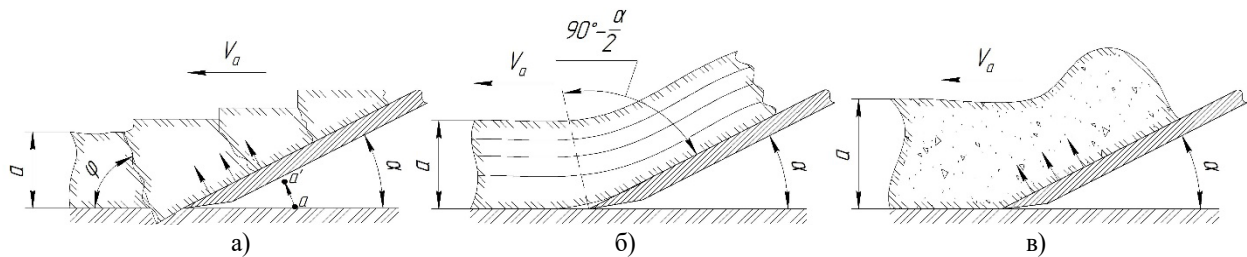


Рис. 1. Деформация пласта под действием клина:

- а) сухого уплотненного связного пласта; б) влажного связного задернелого пласта; в) сухого несвязного сыпучего пласта; V_a – скорость перемещения рабочего органа; a – глубина обработки; a' – величина, характеризующая деформацию смятия почвы; α – угол установки рабочей грани клина к горизонтальной плоскости; φ – угол наклона плоскости сдвига почвенного пласта к дну борозды

Fig. 1. Deformation of the layer under the action of a wedge:

- a) Dry compacted cohesive layer; b) Moist cohesive layer with a crust; c) Dry non-cohesive loose layer; V_a – velocity of the working tool; a – treatment depth; a' – parameter characterizing soil crushing deformation; α – angle of the wedge's working edge relative to the horizontal plane; φ – angle of the soil layer's shear plane inclination to the furrow bottom

способным снизить тяговое сопротивление и восстановить структуру и плодородие почвы при обработке уплотненных и твердых почв [7, 15-17].

Производство винтовых компрессоров высокой производительности в ООО «Челябинский компрессорный завод» позволяет разработать рабочие органы и машины для обработки почвы с использованием пульсирующего сжатого воздуха.

При данном способе обработки почвы к рабочим органам подается сжатый воздух на требуемую глубину обработки a (м), который производит деформацию и рыхление почвы методом отрыва слоя почвы без ее сжатия и смятия. Процесс можно описать математической моделью, предположив, что почва представляет собой однородное изотропное полупространство ($-\infty < x < \infty$; $-\infty < y < \infty$; $0 \leq z < \infty$) (рис. 2). Свободная энергия однородной упругой среды определяется выражением [8]:

$$F_y = \frac{\lambda}{2}(u_{xx}^2 + u_{yy}^2 + u_{zz}^2) + \mu(u_{xy}^2 + u_{xz}^2 + u_{yz}^2), \quad (2)$$

где u_{ij} ($i, j = x, y, z$) – тензор деформаций; λ, μ – коэффициенты Ламе.

Решая уравнение (2) относительно коэффициентов деформации почвы по осям x, y и z и при известном

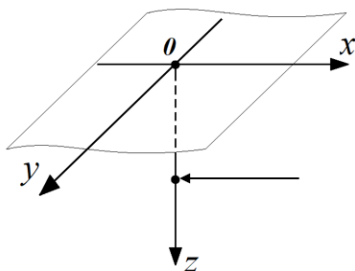


Рис. 2. Геометрия задачи

Fig. 2. Geometry of the problem

давлением и объеме подаваемого сжатого воздуха, можно определить зону рыхления почвы. При этом поданный в почвенный пласт сжатый воздух определенного объема под большим давлением p (МПа) и частотой пульсации ν (Гц), проникая по трещинам, каналам засохших корневых систем растений и ходам дождевых червей, под действием возникающей силы импульса P_δ (кН), расширяясь, производит рыхление и крошение почвы на мелкие фракции, образуя воздушные поры, создавая впереди и с боков рабочего органа зоны дилатансии L (м) (рис. 3) [8]. Одновременно с этим подаваемый воздух при прохождении рабочего органа в почве способствует снижению силы трения.

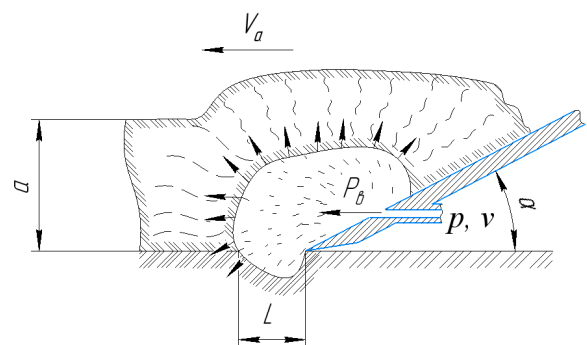


Рис. 3. Деформация пласта

под воздействием сжатого воздуха:

- V_a – скорость перемещения рабочего органа; L – зона дилатансии; P_δ – сила импульса; p – давление воздуха; ν – частота пульсации; a – глубина обработки; α – угол установки рабочей грани клина к горизонтальной плоскости

Fig. 3. Deformation of the layer under the influence of compressed air:

- V_a – velocity of the working tool; L – dilatancy zone; P_δ – impulse force; p – air pressure; ν – pulsation frequency; a – treatment depth; α – angle of the wedge's active face relative to the horizontal plane.

В процессе обработки почвы клин и стойка рабочего органа перемещаются по взрыхленной сжатом воздухом почве, что снижает удельное сопротивление почвы и тяговое сопротивление рабочего органа.

Тогда формула (1) примет вид:

$$P_{\text{в}} = mgf_{\text{в}} + K_{\text{в}} a \frac{b_{\text{в}} + d + 2L}{2} + \varepsilon_{\text{в}} \frac{b_{\text{в}} + d + 2L}{2} a V_{\text{а}}^2, \quad (3)$$

где $f_{\text{в}}$ – коэффициент, характеризующий силы трения на протаскивание орудия в открытой борозде; $K_{\text{в}}$ – удельное сопротивление почвы при подаче пульсирующего сжатого воздуха; $\varepsilon_{\text{в}}$ – скоростной коэффициент; $b_{\text{в}}$ – ширина зоны рыхления почвы на уровне поверхности поля под воздействием сжатого воздуха, м.

Таким образом, при подаче пульсирующего сжатого воздуха снижаются коэффициенты $f_{\text{в}}$, $K_{\text{в}}$, $\varepsilon_{\text{в}}$, увеличивается зона деформации почвы впереди и с боков рабочего органа и дна борозды на величину зоны дилатансии (L , м), что уменьшает тяговое сопротивление рабочего органа с подачей сжатого воздуха ($P_{\text{в}}$, кН). Это увеличивает площадь деформации почвы одним рабочим органом при одновременном увеличении крошения почвы, росте ее вспушенности и снижает удельные затраты энергии на единицу обработанной площади.

Основными требованиями при внедрении нового способа обработки почвы являются снижение удельных затрат энергии на выполнение работ, снижение тягового сопротивления орудия, повышение производительности агрегата при одновременном улучшении

агротехнических показателей работы. Рост производительности обуславливается увеличением рабочей скорости агрегата за счет снижения тягового сопротивления и ростом ширины захвата агрегата по причине расширения зон деформации почвы каждым рабочим органом и, соответственно, увеличения расстояний их расстановки по ширине (междуследий).

Для проверки теоретических предположений разработана схема конструкции чизельного рабочего органа с подачей пульсирующего сжатого воздуха (патент на полезную модель № 228363 [9]) (рис. 4) и проведены полевые опыты машинно-тракторного агрегата, состоящего из трактора, винтовой компрессорной установки КВ-5/10, чизельного орудия с разработанными рабочими органами и системы подачи пульсирующего сжатого воздуха (рис. 5). Винтовая компрессорная установка КВ-5/10 имеет следующие характеристики: производительность – 5 м³/мин; давление рабочее (избыточное) – 1,0 МПа; мощность номинальная – 35,3 кВт; частота вращения привода винтового блока – 2200 мин⁻¹.

Чизельный рабочий орган для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом состоит из стойки 1, долота 3 в сборе, жестко закрепленного на стойке под углом 28°, пневмотрубки 2, подводящей сжатый воздух к выходным сменным наконечникам 6, 7, 8 и 9 диаметром 3 и 5 мм, связанной с пневмомагистралью орудия через подводящий трубопровод 5 и электроклапан 4, создающий пульсирующий поток сжатого воздуха с частотой от 5 до 30 Гц,

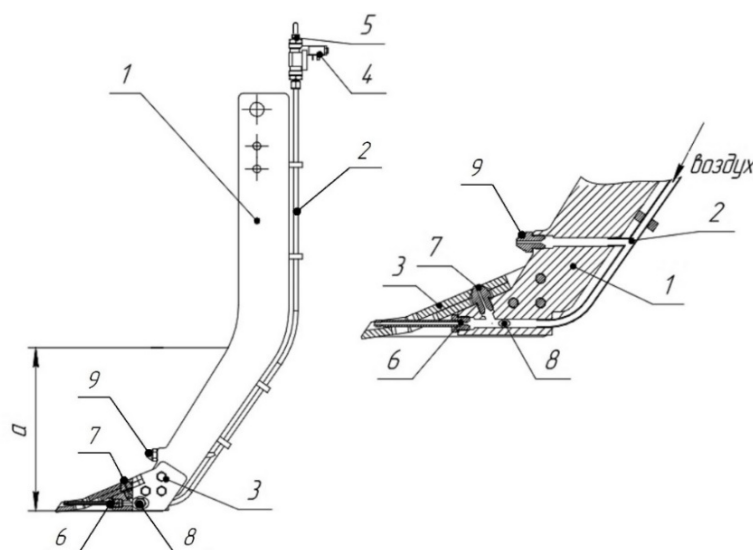


Рис. 4. Чизельный рабочий орган для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом:

- 1 – стойка; 2 – пневмотрубки; 3 – долото в сборе; 4 – электроклапан;
- 5 – подводящий трубопровод, связанный с пневмомагистралью;
- 6, 7, 8, 9 – наконечники подачи пульсирующего сжатого воздуха

Fig. 4. Chisel working tool for soil treatment with pulsating compressed air:

- 1 – tine; 2 – pneumatic tubes; 3 – combined chisel bit; 4 – solenoid valve; 5 – supply pipeline connected to the pneumatic main;
- 6, 7, 8, 9 – nozzles for pulsating compressed air supply

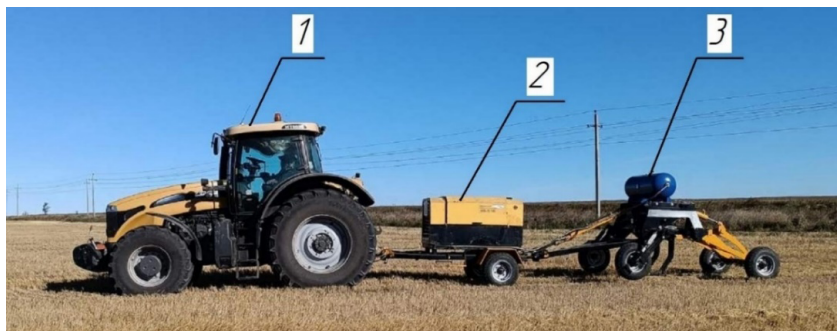


Рис. 5. Экспериментальный агрегат:

1 – трактор; 2 – компрессорная установка; 3 – экспериментальная установка с чизельными рабочими органами

Fig. 5. Experimental unit:

1 – tractor; 2 – compressor unit; 3 – experimental installation with chisel working tools

регулируемый через пульт управления. Давление воздуха в системе регулируется в пределах 0,5...1,1 МПа в зависимости от состояния почвы.

При проведении экспериментальных исследований использовали поверенные приборы и аппаратуру. Агротехнические и энергетические показатели работы рабочего органа определяли с использованием стандартных методик. Для определения тягового сопротивления использовали тензометрическое звено на 7 т, запись сигналов выполняли на измерительный комплекс МПС-200. Глубину обработки определяли щупом с точностью $\pm 0,5$ см. Для определения вспушенности, ширины и глубины развальной борозды, рельефа поверхности поля и дна борозды использовали координатную рейку. Проводили замеры через 5 см. Для определения крошения почвы использовали рулетку, секундомер, емкость с ситами разных размеров ячеек и весы электронные с точностью до 1 г.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования проведены в КФК «Берёзка» Чесменского района Челябинской области летом 2024 г. на стерневом фоне после уборки пшеницы. Рельеф поля – ровный. Среднее значение влажности почв на глубине 0...0,3 м составляло 18,37%, почва после проливных дождей была уплотнена, и ее твердость на глубине 0...0,05 м соответствовала 1,69 МПа, в слое 0,05...0,1 м – 3,38 МПа, в слое 0,1...0,2 м – 3,7 МПа, на глубине 0,2...0,3 м – 4,05 МПа. Тип почвы – средний суглинок.

Экспериментальные исследования показали, что подача сжатого воздуха в почву под определенным давлением и частотой улучшает устойчивость хода чизельных рабочих органов по глубине обработки, повышает крошение почвы и увеличивает глубину и ширину зоны рыхления почвы (рис. 6), а также снижает тяговое сопротивление и удельное сопротивление почвы. В дальнейшем, при внедрении компрессоров с приводом от ВОМ трактора, при обработке почвы

часть мощности трактора будет расходоваться на привод компрессора через ВОМ трактора. Это должно быть учтено при расчете эффективности внедрения способа обработки почвы с использованием сжатого воздуха. При этом агрегат будет более компактным.

Результаты экспериментальных исследований и расчетов мощности на привод компрессора приведены в таблице. Исследования провели при скоростях движения агрегата $V_a = 1,38$ и $1,94$ м/с и подаче сжатого воздуха под давлением $p = 0,9...1,1$ МПа с частотой пульсаций $\nu = 10$ Гц с установленными наконечниками диаметром $d_n = 3$ и 5 мм. Эксперимент повторили и без подачи сжатого воздуха. При этом тяговое сопротивление рабочих органов P , кН, находилось в пределах 5,05...7,60 кН.

Затраты мощности двигателя на протаскивание одного рабочего органа (N_e , кВт) определяли по формуле:

$$N_e = \frac{Pv_a}{\eta_m \eta_t},$$

где $\eta_m = 0,9$ – коэффициент использования силы тяги трактора; $\eta_t = 0,6$ – КПД трансмиссии трактора.



Рис. 6. Профиль поверхности поля после прохода экспериментального агрегата

Fig. 6. Profile of the field surface after being treated with the experimental unit

Общие затраты мощности на привод одного рабочего органа (N_0 , кВт) учитывают N_e и мощность двигателя трактора, используемую на привод компрессора (N_1), $N_0 = N_e + N_1$.

Удельные затраты мощности обработки –

$$K_{уд} = \frac{N_0}{S}, \text{ кВт/м}^2.$$

Ширина захвата агрегата с трактором –

$$B = \frac{N_{e0}}{K_{уд} a},$$

где N_{e0} – мощность двигателя $N_{e0} = 220$ кВт; a – глубина обработки, м;

Производительность агрегата (W , га/ч) –

$$W = 0,36 B v_a \tau,$$

где τ – коэффициент использования времени смены.

Значение мощности N_e , расходуемой на преодоление тягового сопротивления одного рабочего органа, находится в пределах от 12,9 до 27,3 (кВт). При обработке почвы с использованием сжатого воздуха на привод компрессора через ВОМ трактора расходуется 1,76...8,25 кВт в зависимости от диаметра наконечника. Суммарная мощность двигателя трактора

N_0 , используемая на работу одного рабочего органа, находится в диапазоне 14,9...30,91 кВт. Площадь зоны рыхления почвы S при работе одного рабочего органа с подачей сжатого воздуха соответствует 0,1919...0,2057 м², а без подачи сжатого воздуха – 0,1167...0,145 м², то есть снижается на 30...90%, что оказывает влияние на удельные затраты мощности на обработку почвы $K_{уд}$.

Расчетное значение ширины захвата чизельного орудия (B) для трактора К-730 с мощностью двигателя $N_0 = 220$ кВт при использовании сжатого воздуха увеличивается на 11...67% по сравнению с вариантом без подачи сжатого воздуха.

Расчеты показывают, что при подаче сжатого воздуха через три наконечника диаметром 5 мм производительность агрегата (W , га/ч) увеличивается на 24% при $v_a = 1,38$ м/с и на 12% при $v_a = 1,94$ м/с. При использовании одного наконечника диаметром 5 мм и двух наконечников диаметром 3 мм производительность увеличивается на 47% при $v_a = 1,38$ м/с, на 33% – при $v_a = 1,94$ м/с. При установке трех наконечников диаметром 3 мм увеличение производительности при $v_a = 1,38$ м/с составило 68%, при $v_a = 1,94$ м/с – 45%.

Энергетические показатели работы чизельных рабочих органов на обработке почвы на глубину 0,3 м с применением сжатого воздуха и без его использования

Таблица

Energy indicators of the chisel working tools during soil treatment at a depth of 0.3 m with and without the use of compressed air

Table

Давление в системе, p , МПа System pressure, p , MPa	Частота импульсов, ν , Гц Pulse frequency, ν , Hz	Скорость движения агрегата v , м/с Machine speed, v , m/s	Количество и диаметр наконечников, мм Number and diameter of nozzles, mm	Тяговое сопротивление одного рабочего органа, R , кН Traction resistance of one working tool, R , kN	Затраты мощности двигателя на протаскивание одного рабочего органа, N_e , кВт Power consumption for dragging one working tool, N_e , kW	Мощность двигателя трактора, используемая на привод компрессора, N_1 , кВт Tractor engine power used for compressor drive, N_1 , kW	Общие затраты мощности на привод одного рабочего органа N , кВт Total power consumption for driving one working tool, N , kW	Площадь зоны рыхления, S , м ² Loosening zone area, S , m ²	Удельные затраты мощности обработки, $K_{уд}$, кВт/м ² Specific processing power consumption, $K_{уд}$, kW/m ²	Ширина захвата агрегата с трактором B , м Unit's working width with tractor B , m	Производительность агрегата, W , га/ч Unit productivity, W , ha/h
0,9...1,1	10	1,38	3 шт. по 5 мм	5,05	12,90	8,25	21,15	0,2057	102,8	7,10	2,82
		1,94		6,31	22,66	8,25	30,91	0,1838	168,2	4,35	2,43
		1,38	1 шт. 5 мм 2 шт. 3 мм	5,36	13,69	3,92	17,61	0,2026	86,9	8,40	3,34
		1,94		6,43	23,10	3,92	27,02	0,1919	140,8	5,20	2,90
		1,38	3 шт. по 3 мм	5,36	13,69	1,76	15,45	0,2026	76,2	9,60	3,81
		1,94		6,43	23,10	1,76	24,86	0,1919	129,5	6,66	3,16
–	–	1,38	–	5,86	14,90	0	14,90	0,1167	127,7	5,70	2,26
–	–	1,94	–	7,60	27,30	0	27,30	0,1450	188,3	3,89	2,17

Результаты экспериментальных исследований и произведенные расчеты показывают эффективность внедрения использования сжатого воздуха при основной обработке почвы (чизелевании). С увеличением диаметра выходного отверстия наконечника затраты мощности двигателя на привод компрессора увеличиваются в квадратической зависимости, что снижает эффективность его использования. Поэтому диаметр отверстия $d_n = 5$ мм стоит применять только при обработке твердых и плотных почв, а также при обработке на глубину свыше 25 см. При уменьшении твердости и плотности почвы, а также при глубине обработки менее 20 см следует применять наконечники меньшего диаметра при уменьшении давления воздуха в системе до 0,5 МПа.

Результаты апробации экспериментального агрегата подтвердили гипотезу. Обработка почвы с подачей сжатого воздуха привела: к снижению тягового сопротивления и удельного сопротивления почвы; увеличению глубины и ширины и площади зоны рыхления почвы; увеличению ширины захвата орудия и междуследий между рабочими органами; повышению производительности агрегата. Также выявлены положительные стороны обработки почвы сжатым воздухом: увеличение крошения и вспушенности почвы, насыщение ее воздухом; увеличение устойчивости хода орудия по глубине; устранение развальной борозды; разрушение и устранение плужной подошвы; накопление влаги осенью и весной за счет устранения смыва и проникновения влаги в нижние слои; уничтожение корневой системы сорняков.

Применение сжатого воздуха является перспективным при основной обработке без оборота пласта с чизельными рабочими органами на глубину 20...35 см, при дополнительной обработке почвы рыхлительными рабочими органами до 10...16 см, при окучивании картофеля и других овощных культур, а также при рыхлении междурядий пропашных культур (морковь, капуста, свекла).

Необходимо проводить дальнейшие исследования с целью обоснования технологических параметров и режимов работы (давление, производительность, рабочая скорость, глубина расположения форсунок, частота пульсаций), а также конструктивных параметров (диаметр наконечника) для различных видов обработки почвы: основной для различных технологий возделывания, дополнительной для работы с пропашными культурами, в том

числе корнеклубнеплодами. Необходимо исследовать возможность изменения технологических параметров в процессе работы в зависимости от текущих почвенно-климатических условий, используя данные цифровых карт полей и датчиков, установленных на машинно-тракторном агрегате. Можно интегрировать в систему подачи воздуха систему дифференцированного впрыска органических или минеральных удобрений, различных биопрепаратов в жидком виде. Необходимо создавать новые виды рабочих органов, в которых отсутствуют элементы, предназначенные для сжатия или смятия почвы (лемех, долото).

Разработка привода винтового блока компрессора от вала отбора мощности трактора повысит мобильность и снизит стоимость системы сжатия и подачи воздуха. Разработка высокоэффективных фильтров, не оказывающих влияния на давление и производительность подаваемого сжатого воздуха, позволит устранить повышенное содержание масла в сжатом воздухе в связи с особенностями работы винтового блока компрессора.

Выводы

1. Рациональным является использование сжатого воздуха при обработке почвы орудиями с чизельными рабочими органами под давлением 0,9...1,1 МПа и частотой импульсов 10 Гц.

2. Для различных почвенных условий чизельные рабочие органы необходимо оснащать наконечниками для подачи воздуха диаметром 3 и 5 мм. При использовании одного наконечника диаметром 5 мм и двух наконечников диаметром 3 мм удельные затраты мощности на обработку почвы при скорости агрегата 1,38 м/с составляют 86,9 кВт/м², что на 32% меньше, чем без использования сжатого воздуха.

3. Использование сжатого воздуха при обработке почвы улучшает устойчивость хода чизельных рабочих органов по глубине. Также за счет увеличения вспушенности, расширения зон деформации почвы и междуследий рабочих органов увеличивается ширина захвата орудия – в среднем на 29%.

4. Почвообрабатывающий агрегат с использованием сжатого воздуха повышает крошение почвы и увеличивает глубину и ширину зоны рыхления (объемную деформацию) почвы на 30...90%.

5. За счет использования сжатого воздуха тяговое сопротивление снижается до 33% и увеличивается производительность почвообрабатывающего агрегата на 12...68%.

Список источников

1. 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. Брянск, 2023. С. 14-20. EDN: VKHOKT
2. Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B. et al. Development of a frontal plow for smooth, furless plowing with cutoffs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1030. VII International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education», «IPICSE2020», 2021. P. 012135. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012135>
3. Способ обработки почвы: Патент RU2457651 C1, МПК A01B79/02; заявка № 2011105850/13 / Н.К. Мазитов, В.В. Бледных, Ю.Б. Четыркин и др.; опубл. 10.08.2012. EDN: QRPKNG
4. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Khabibullin R.F., Imangulov V.Kh. Experimental analysis of traction resistance and fuel consumption of a strip tillage and sowing implement. Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2024;203:333-345. EDN: BQEWAM
5. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Разработка типажей сельскохозяйственных технологий для системы машин // Технический сервис машин. 2024. Т. 62, № 4. С. 136-148. EDN: IPGACC
6. Мударисов С.Г., Устинов Н.Н., Мартыненко А.С. Моделирование взаимодействия вибрационного рабочего органа почвообрабатывающей машины с почвой // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2024. № 4 (72). С. 142-147. EDN: CBRCLW
7. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Обоснование приемов обработки почвы при освоении залежных земель // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 1 (64). С. 28-35. EDN: SLJVYK
8. Ялалетдинов Д.А., Рахимов И.Р., Куликова А.П. и др. Моделирование процессов рыхления почвы сжатым воздухом // Челябинский физико-математический журнал. 2024. Т. 9, № 1. С. 160-168. EDN: LVCIVQ
9. Чизельный рабочий орган для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом: Патент на полезную модель RU228363 U1, заявка № 2024109584 / Р.С. Рахимов, А.Р. Ялалетдинов, И.Р. Рахимов и др.; опубл. 26.08.2024. EDN: ZCTYCY
10. Алдошин Н.В. Моделирование качества выполнения механизированных работ // Горняцкие чтения: Сборник докладов 1-й Международной научно-практической конференции. 2013. С. 6-13. EDN: UNMDBP
11. Косолапов В.М., Цыгуткин А.С., Алдошин Н.В., Лылин Н.А. Агрономические основы инженерного обеспечения биологизации земледелия // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 41-47. EDN: IZUIQD
12. Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связанных задерненных почв // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 3. С. 18-20. EDN: NVAWBR
13. Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Золотарев А.С. Влияние геометрических и установочных параметров плужных рабочих органов на агротехнические и силовые характеристики // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 2. С. 10-16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-10-16>
14. Лобачевский Я.П., Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И. Инновационный многофункциональный агрегат для альтернативной обработки почвы // Техника и оборудование для села. 2021. № 10 (292). С. 11-15. EDN: XRCZZN

References

1. Starovoytov S.I., Grin' A.M., Akhalaia B.Kh. et al. On the intensity of the impact of compressed air on the surface layer of loamy soil. In: Sovremennye tendentsii razvitiya agrarnoy nauki: Proceedings of the II International scientific and practical conference. Bryansk, 2023. Pp. 14-20. (In Russ.)
2. Mamatov F., Aldoshin N., Mirzaev B. et al. Development of a frontal plow for smooth, furless plowing with cutoffs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1030. VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE2020. 2021. P. 012135. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012135>
3. Mazitov N.K., Blednykh V.V., Chetyrkin Yu.B. et al. Soil treatment method: Patent, No. 2457651 Russian Federation, IPC A01B79/02 (2006.01), 2012. (In Russ.)
4. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Khabibullin R.F., Imangulov V.Kh. Experimental analysis of traction resistance and fuel consumption of a strip tillage and sowing implement. Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2024;203:333-345.
5. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevskiy Ya.P. Development of types of agricultural technologies for the machine system. *Machinery Technical Service*. 2024;62;4:136-148. (In Russ.)
6. Mudarisov S.G., Ustinov N.N., Martynenko A.S. Simulation of interaction of a vibrating working tool of a soil tillage machine with the soil using the discrete element method. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2024;4:142-147. (In Russ.)
7. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Justification of tillage methods in the development of fallow lands. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13;1:28-35. (In Russ.)
8. Yalaletdinov D.A., Rakhimov I.R., Kulikova A.P. et al. Simulation of soil loosening processes with compressed air. *Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*. 2024;9;1:160-168. (In Russ.)
9. Rakhimov R.S., Yalaletdinov A.R., Rakhimov I.R. et al. Chisel working tool for soil treatment with pulsating compressed air: Patent, No. 228363 Russian Federation, IPC A01B35/24 (2024.01), 2024. (In Russ.)
10. Aldoshin N.V. Modeling the quality of mechanized work. In: *Goryachkinskie chteniya*: Collection of reports of the 1st International scientific and practical conference, 2013:6-13. (In Russ.)
11. Kosolapov V.M., Tsygutkin A.S., Aldoshin N.V., Lylin N.A. Mechanized agronomy as means for arable farming biologization. *Kormoproizvodstvo*. 2022;3:41-47. (In Russ.)
12. Lobachevskiy Ya.P. Strength and deformation properties of cohesive soddy soils. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2011;3:18-20. (In Russ.)
13. Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Zolotarev A.S. Influence of geometric and setup parameters of the arrangement of working tools on agrotechnical and power characteristics. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(2):10-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-2-10-16>
14. Lobachevskiy Ya.P., Akhalaya B.Kh., Shogenov Yu. Kh., Starovoytov S.I. Innovative multifunctional unit for alternative tillage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;10:11-15. (In Russ.)
15. Starovoytov S.I. On the impact of a gas-jet emitter on surface layer of loamy soil. *Konstruirovaniye, ispolzovanie i nadezhnost mashin selskokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2024;1:49-56. (In Russ.)

15. Старовойтов С.И. О воздействии газоструйного излучателя на поверхностный слой суглинистой почвы // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2024. № 1 (23). С. 49-56. EDN: QYQZOU

16. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023;109:37-44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001>

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

Информация об авторах

¹ Измайлов Андрей Юрьевич, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, директор; vim@vim.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>; SPIN-код: 9727-4472

² Дорохов Алексей Семенович, академик РАН, д-р техн. наук, профессор РАН, заместитель директора; dorokhov.vim@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>; SPIN-код: 6711-8971

³ Рахимов Ильдар Раисович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие»; ildarr@bk.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>; SPIN-код: 4813-6930

⁴ Алдошин Николай Васильевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории почвообрабатывающих и мелиоративных машин; naldoshin@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>; SPIN-код: 6032-9021

⁵ Ялалетдинов Денис Альбертович, канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Челябинский компрессорный завод»; den@chkz.ru

^{1, 2, 4} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

³ Южно-Уральский государственный аграрный университет; 457103, Российская Федерация, Челябинская область, г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, 13

⁵ ООО «Челябинский компрессорный завод»; 456671, Российская Федерация, Челябинская область, Красноармейский район, 14-й километр автодороги Челябинск-Новосибирск

Вклад авторов:

А.Ю. Измайлов – общее руководство исследованием;
А.С. Дорохов – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
И.Р. Рахимов – методология, проведение исследования;
Н.В. Алдошин – администрирование проекта, создание черновика рукописи;
Д.А. Ялалетдинов – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 24.04.2025, после рецензирования и доработки 11.07.2025; принята к публикации 14.07.2025

16. Mudarisov S.G., Lobachevsky Ya.P., Farkhutdinov I.M. et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing. *Journal of Terramechanics*. 2023;109:37-44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.06.001>

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>

Author Information

Andrey Yu. Izmaylov¹, Full Member of RAS, DSc (Eng), Professor, Director; vim@vim.ru;

<https://orcid.org/0000-0003-1143-7286>

Aleksei S. Dorokhov², Full Member of RAS, DSc (Eng), Professor, Deputy Director; dorokhov.vim@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

Ildar R. Rakhimov³, DSc (Eng), Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery, and Land Cultivation; ildarr@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>

Nikolay V. Aldoshin⁴, DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer of the Laboratory of Soil-Handling and Reclamation Machines; naldoshin@yandex.ru;

<https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

Denis A. Yalaletdinov⁵, CSc (Eng), General Director of LLC “Chelyabinsk Compressor Plant”; den@chkz.ru

^{1, 2, 4} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Moscow, Russia, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

³ South Ural State Agrarian University; 457103, Chelyabinsk Region, Troitsk, Imeni Yu.A. Gagarina Str., 13

⁵ LLC “Chelyabinsk Compressor Plant”; 456671, Chelyabinsk Region, Krasnoarmeysky District, 14th Kilometer of the Chelyabinsk-Novosibirsk Highway

Author Contributions:

A.Yu. Izmaylov – research supervision;
A.S. Dorokhov – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
I.R. Rakhimov – methodology, investigation;
N.V. Aldoshin – project administration, writing – original draft;
D.A. Yalaletdinov – investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Received 24.04.2025; Revised 11.07.2025; Accepted 14.07.2025