

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЫХЛЕНИЯ ПОЧВЫ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

Д. А. Ялалетдинов<sup>1</sup>, И. Р. Рахимов<sup>1,2</sup>, А. П. Куликова<sup>2</sup>, И. В. Бычков<sup>3,a</sup>,  
Д. А. Кузьмин<sup>3</sup>, М. О. Усик<sup>3</sup>, В. А. Толкачев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Челябинский компрессорный завод», Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

<sup>3</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>a</sup>bychkov@csu.ru

Рассмотрена модель для описания рыхления почвы при воздействии на неё сжатым воздухом. Модель позволяет рассчитать в зависимости от давления сжатого воздуха, диаметра отверстия и глубины залегания точки подачи зону дилатансии (области, внутри которой создаваемые напряжения превысят пороговые и начнётся процесс рыхления). Разработанная модель также применена для описания рыхления почвы при нескольких точках подачи воздуха и при различном направлении струи.

**Ключевые слова:** моделирование физических процессов, обработка почвы, рыхление, сжатый воздух.

### Введение

Рыхление — один из базовых этапов обработки почвы. На этом этапе повышаются влаго- и воздухопроницаемые свойства грунта. В процессе рыхления разрушается плотная корка, образующаяся на поверхности грунта. Для того чтобы улучшить характеристики обработанной почвы, одним из подходов является создание рыхлителя для разработки грунта энергией сжатого газа [1–7].

Использование сжатого воздуха для вспашки почвы помогает улучшить её рыхление благодаря двум основным механизмам: аэрационному и механическому.

Аэрационный механизм заключается в том, что сжатый воздух поставляется в почву под давлением, что приводит к увеличению воздушных каналов в почве и улучшению её проветривания. При этом корни растений получают больше кислорода, что положительно сказывается на их развитии. Также проветренная почва становится менее плотной и более податливой, что облегчает процесс рыхления.

Механический механизм заключается в том, что струя сжатого воздуха, направленная на поверхность почвы, способна разрушить земляные комья, которые мешают рыхлению почвы. Выбор оптимальных параметров сжатого воздуха для обработки почвы зависит от многих факторов, включая тип почвы, влажность, содержание органических веществ и другие. Однако общепринятой методики выбора параметров для обработки почвы сжатым воздухом нет.

Способ рыхления почвы с помощью сжатого воздуха известен давно [8–11], оформлены патенты на устройства по рыхлению сжатым воздухом [1–7], но в широкое применение они не вошли. Однако математические модели, использованные в этих работах, не позволяют удовлетворительно описывать процессы, происходящие при обработке почвы. В настоящей работе предложена математическая модель,

описывающая упругие напряжения в грунте при создании давления струёй сжатого воздуха.

Разработанная модель позволяет оценить необходимые характеристики рыхлителя с применением сжатого воздуха для наиболее эффективного рыхления в условиях заданных характеристик грунта.

## Модель

Процесс вспашки грунта при использовании сжатого воздуха, выходящего из отверстия в плуге, можно описать простейшей математической моделью.

Предположим, что грунт представляет собой однородное упругое полупространство ( $-\infty < x < \infty$ ,  $-\infty < y < \infty$ ,  $0 < z < \infty$ ), а источник сжатого воздуха находится на глубине  $z = c$  (рис. 1). Похожая задача рассмотрена в работе [12].

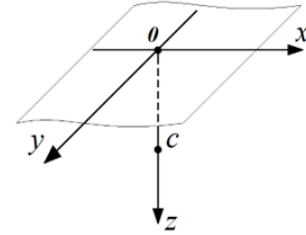


Рис. 1. Геометрия задачи

Используя модель грунта как однородного изотропного полупространства, запишем свободную энергию однородной изотропной упругой среды в виде

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

где  $u_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) — тензор деформаций,  $\lambda$  и  $\mu$  — коэффициенты Ламе. Коэффициенты  $\lambda$  и  $\mu$  связаны с модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$  следующим образом:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Уравнение равновесия упругой среды имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + \rho g_i = 0, \quad \sigma_{ik} = \frac{\partial F_y}{\partial u_{ik}}.$$

А с учётом того, что

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right),$$

уравнение равновесия можно записать в более удобной векторной форме

$$\Delta \vec{u} + \frac{1}{1 - 2\nu} \text{grad div } \vec{u} = -\rho \vec{g} \frac{2(1 + \nu)}{E}. \quad (1)$$

Предполагая, что на поверхность грунта ( $z = 0$ ) не действуют никакие силы, на ней должны выполняться граничные условия

$$\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0.$$

Для решения уравнения (1) воспользуемся представлением Галёркина [13]. Введём оператор  $\mathbf{L}$  формулами для его компонент

$$L_{ij} = \delta_{ij} \Delta + k \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j}, \quad k = \frac{\lambda + \mu}{\mu}.$$

Тогда уравнение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$\mathbf{L} \vec{u} = -\frac{\vec{X}}{\mu}, \quad X_i = \rho g_i. \quad (2)$$

Далее выразим компоненты вектора  $\vec{u}$  с помощью векторной функции  $\vec{\chi}$  следующим образом:

$$u_1 = \begin{vmatrix} \chi_1 & L_{12} & L_{13} \\ \chi_2 & L_{22} & L_{23} \\ \chi_3 & L_{32} & L_{33} \end{vmatrix}, u_2 = \begin{vmatrix} L_{11} & \chi_1 & L_{13} \\ L_{21} & \chi_2 & L_{23} \\ L_{31} & \chi_3 & L_{33} \end{vmatrix}, u_3 = \begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} & \chi_1 \\ L_{21} & L_{22} & \chi_2 \\ L_{31} & L_{32} & \chi_3 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Подставляя выражения (3) в уравнение (2), получим уравнение относительно новой функции  $\vec{\chi}$ :

$$\Delta\Delta\Delta\chi_i + \frac{\chi_i}{\lambda + 2\mu} = 0. \quad (4)$$

Обозначим  $\Delta\chi_i = H_i$ , тогда  $\vec{u}$  можно представить в виде

$$\vec{u} = (1 + k)\Delta\vec{H} - k \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{H},$$

а уравнение (4) тогда можно записать как

$$(\lambda + 2\mu)\Delta\Delta\vec{H} + \vec{X} = 0. \quad (5)$$

Решая уравнение (5), можно найти компоненты вектора Галёркина  $\vec{H}$ , который однозначно определяет компоненты тензора упругих напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_{ii} &= 2(1 - \nu) \frac{\partial \Delta H_i}{\partial x_i} + \nu \Delta \operatorname{div} \vec{H} - \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} (\operatorname{div} \vec{H}), \\ \sigma_{ij} &= (1 - \nu) \left( \frac{\partial \Delta H_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \Delta H_j}{\partial x_i} \right) - (\operatorname{div} \vec{H})_{ij}. \end{aligned}$$

Для наиболее распространённых случаев силы воздействия  $\vec{X}$  решения уравнения (5) известны.

Исследуемому случаю подачи сжатого воздуха под давлением через небольшое отверстие в рабочем органе плуга наиболее близок случай тройной двойной силы [14]. Для этого случая компоненты вектора Галёркина имеют следующий вид [15]:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{M_x}{8\pi(1 - \nu)} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{2c^2}{R_2^3} - \frac{4(1 - 2\nu)(1 - \nu)}{R_2 + z + c} \right), \\ H_y &= \frac{M_y}{8\pi(1 - \nu)} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{2c^2}{R_2^3} - \frac{4(1 - 2\nu)(1 - \nu)}{R_2 + z + c} \right), \\ H_z &= \frac{M_z}{8\pi(1 - \nu)} \left( \frac{4c}{R_2} - \frac{2c(x^2 + y^2 + z(z - c))}{R_2^3} + \frac{2(1 - 2\nu)(x^2 + y^2)}{R_2(R_2 + z + c)} \right. \\ &\quad \left. + 4(1 - \nu)(1 - 2\nu) \ln(R_2 + z + c) + \frac{z - c}{R_1} - \frac{(1 - 4\nu)(z - c)}{R_2} \right), \end{aligned}$$

где  $M = Fd = PSd = 2\pi PR_3$ ,  $c$  — глубина, на которой осуществляется подача сжатого воздуха,  $R_{1,2} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z \mp c)^2}$  — расстояние до точки наблюдения от точки приложения давления и её изображения над поверхностью почвы,  $d$  — диаметр отверстия, через которое подаётся сжатый воздух,  $R$  — его радиус,  $P$  — давление, создаваемое сжатым воздухом.

В качестве критерия рыхления почв используем понятие о зоне дилатансии — области, в которой наблюдается разуплотнение почвы. Количественно область дилатансии может быть вычислена на основе следующего критерия [16]:

$$D_\tau = \tau - \alpha(P + \rho gz) - S > 0,$$

где  $\tau = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2} + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)$  — интенсивность касательных напряжений,  $P = -\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}$  — давление,  $\alpha$  — коэффициент внутреннего трения,  $S$  — сцепление породы.

Для каждой из почв существуют свои коэффициенты внутреннего трения и сцепления породы. Удельное сцепление грунтов варьируется в диапазоне 1–80 кПа [17], а сила сцепления грунтов — от 0.1 до 8 т/м<sup>2</sup> [18].

## Результаты

Для численных расчётов будем использовать характерные параметры почв  $\rho = 2900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0.25$ ,  $S = 1$  кПа. Характерная картина результатов расчёта зоны дилатансии приведена на рис. 2. Видно, что область дилатансии близка к эллипсоидальной, с характерными продольными и поперечными размерами  $\Delta x$  и  $\Delta z$ .

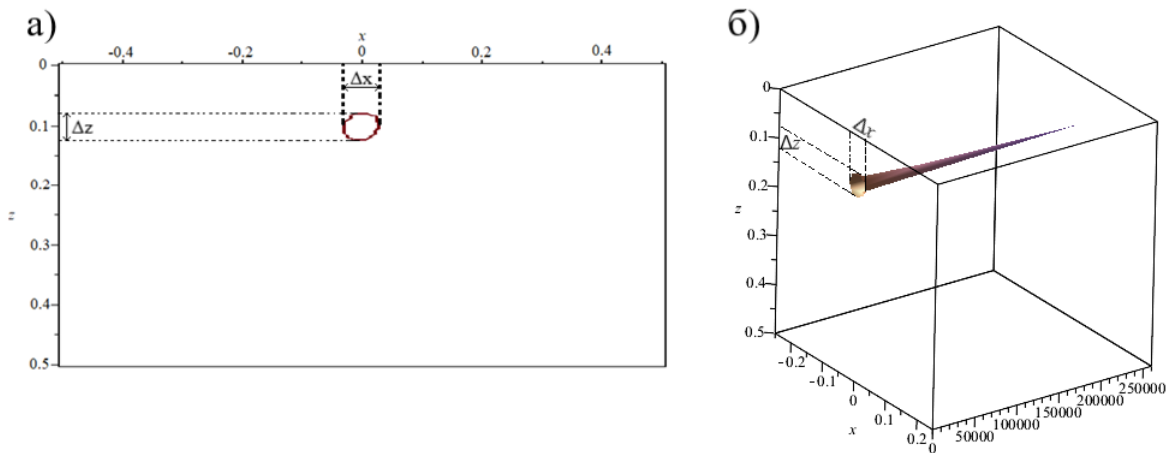


Рис. 2. Границы зоны дилатансии (а) и её распределение в плоскости  $x - z$  (б), рассчитанные для параметров  $\alpha = 0.25$ ,  $S = 1$  кПа, сжатым воздухом с давлением 10 атм на глубине залегания 10 см

Расчёты зон дилатансии (области разрушения грунта) для различных коэффициентов внутреннего трения  $\alpha$ , сцепления породы  $S$  и глубины залегания источника сжатого воздуха приведены на рис. 3–6.

Как видно из рис. 3, увеличение сцепления породы и коэффициента внутреннего трения приводят к уменьшению зоны дилатансии, причём изменения в поперечном направлении  $\Delta z$  более заметны.

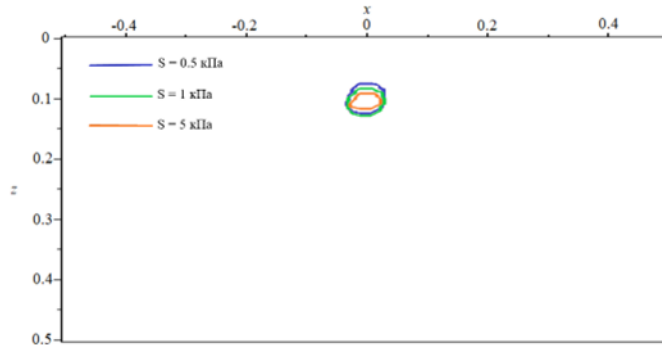


Рис. 3. Зона дилатансии при изменении параметра сцепления породы  $S$

Увеличение давления сжатого воздуха ожидаемо увеличивает область дилатансии во всех направлениях. При больших глубинах залегания поперечный размер области дилатансии уменьшается. В то же время продольный размер практически не изменяется.

Для лучшей наглядности на рис. 4 приведены зависимости  $\Delta x$  и  $\Delta z$  от давления воздуха при различной глубине залегания. Из рисунка видно, что продольный размер почти не изменяется при увеличении давления при малой глубине залегания, в то время как поперечный размер линейно растёт. При большей глубине залегания

поведение обратное: продольный размер линейно увеличивается с ростом давления, а поперечный почти не изменяется.

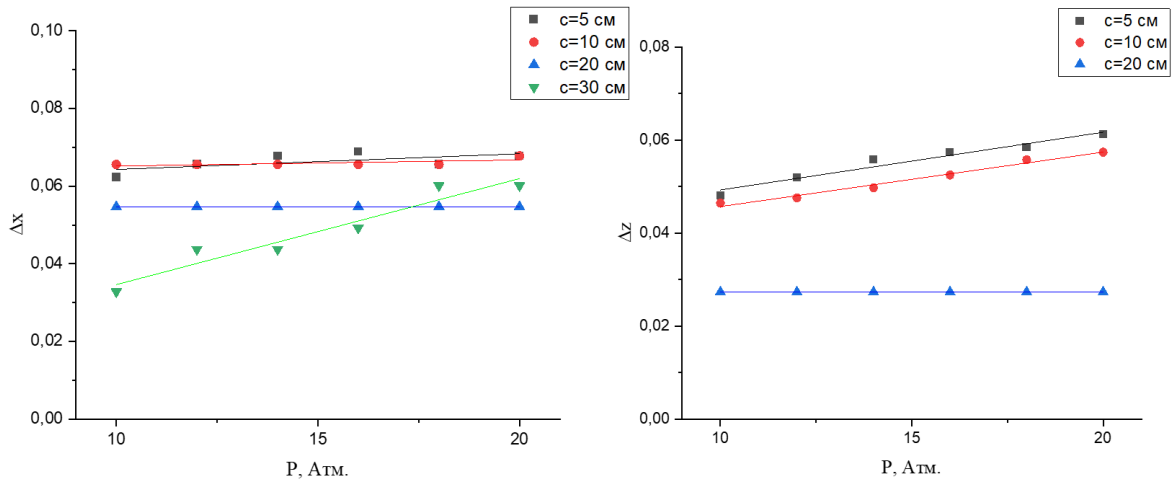


Рис. 4. Зависимости продольного и поперечного размеров  $\Delta x$  и  $\Delta z$  зоны дилатансии от давления воздуха при различной глубине залегания

Отдельно нужно отметить случай большой глубины залегания и относительно высоких давлений, когда область дилатансии расщепляется на две несвязные области (рис. 5 и 6). При этом рыхление почвы происходит над и под точкой подачи сжатого воздуха.

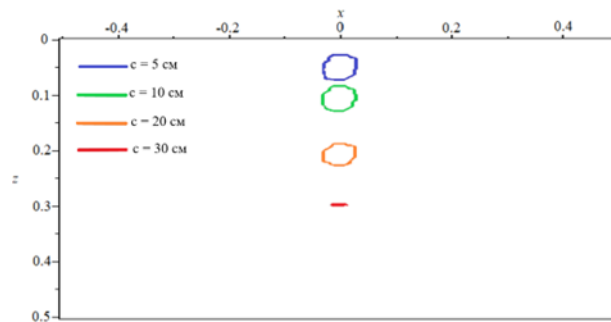


Рис. 5. Зона дилатансии при различной глубине подачи сжатого воздуха.  $P = 10$  атм

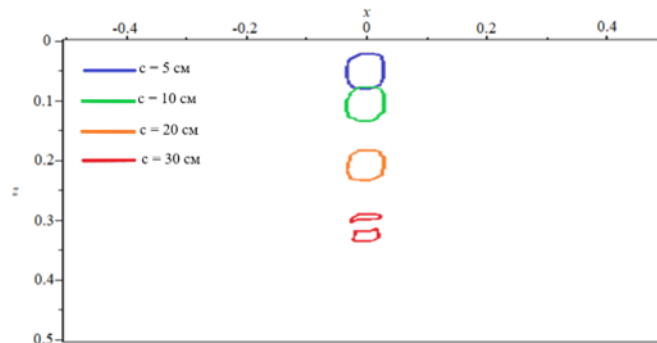


Рис. 6. Зона дилатансии при различной глубине подачи сжатого воздуха.  $P = 20$  атм

## Выводы

Исходя из расчётов зон дилатансии при различных коэффициентах внутреннего трения  $\alpha$ , сцепления породы  $S$  и глубины залегания источника сжатого воздуха  $c$ , можно сделать следующий вывод: зона разрушения грунта тем больше, чем больше давление сжатого воздуха. Радиус зоны разрушения зависит от вышерепе-

численных параметров грунтов. Чем меньше глубина залегания источника сжатого воздуха, тем больше радиус зоны разрушения.

Стоит, однако, отметить, что при очень малой глубине залегания источника область дилатансии может выйти на поверхность, что на практике означает полное удаление слоя почвы с поверхности (сдувание почвы), а этот эффект нежелателен.

Отметим также, что на практике невозможно поддерживать постоянное давление воздуха, поэтому представляется интересным использование импульсного режима, когда сжатый воздух подаётся периодически с периодом  $T$  в течение небольшого интервала времени. В таком случае для эффективного применения данной технологии нужно учитывать скорость движения плуга  $v$ . Каждый последующий импульс сжатого воздуха должен поступать не позднее, чем рабочий орган плуга проедет область дилатансии  $\Delta x$ , сформированную предыдущим импульсом:  $T < \Delta x/v$ . Исходя из этого можно провести оценку частоты, с которой должны следовать импульсы сжатого воздуха. При  $\Delta x = 5$  см,  $v = 5\text{--}10$  км/ч, получим  $f = 1/T = 30\text{--}50$  Гц.

Таким образом, разработанная модель может быть применена для оценки основных характеристик при рыхлении почвы с использованием сжатого воздуха.

## Список литературы

1. **Zinck E.** Method of and device for loosening agriculturally used soil // Пат. 4429647 США, US4429647A. 1984.
2. **Kobashi T., Kobashi I., Iwai M.** Air injection cultivator // Пат. 4760804 США, US4760804A. 1988.
3. **Ивкин В. С.** Газодинамический рыхлитель // Пат. №2052032 РФ, МКИ Е 02 F 5/32. Заявл. 29.12.1993; опубл. 10.01.1996.
4. **Ивкин В. С.** Газодинамический рыхлитель // Пат. №2231601 РФ, МКИ Е 02 F 5/30. Заявл. 25.03.2003; опубл. 27.06.2004.
5. **Ивкин В. С., Морозов В. В.** Устройство для разрушения прочных и мёрзлых грунтов // Пат. №2256751 РФ, МКИ Е 02 F 5/32. Заявл. 20.04.2004; опубл. 20.07.2005.
6. **Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Старовойтов С. И., Ахалая Б. Х., Ценч Ю. С., Коротченя В. М.** Устройство для обработки почвы пульсирующим сжатым воздухом // Пат. №194724 РФ, А01В 35/32. Заявл. 05.03.2019; опубл. 15.05.2019.
7. **Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Ахалая Б. Х., Старовойтов С. И.** Автоматизированная почвообрабатывающая машина с высокотурбулентной воздушной струей // Пат. №2740583 РФ, А01В 79/00. Заявл. 04.09.2020; опубл. 15.01.2021.
8. **Сухов В. А.** Определение давления газа, необходимого для разрушения почвенного пласта // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов : сб. науч. тр. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1987. С. 113–118.
9. **Сухов В. А.** Изменение давления газа в полости рабочего органа при газодинамическом рыхлении почвы // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов : сб. науч. тр. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1988. С. 34–43.
10. **Сухов В. А.** Определение параметров системы подачи сжатого газа импульсного газодинамического рыхлителя почвы // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов : сб. науч. тр. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1989. С. 51–59.
11. **Сухов В. А.** Моделирование на ЭВМ процесса деформирования почвенного пласта при его газодинамическом рыхлении // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов : сб. науч. тр. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1990. С. 30–37.
12. **Mindlin R. D.** Force at a point in the interior of a semi-infinite solid // Physics. 1936. Vol. 7, iss. 5. P. 195–202.

13. **Новацкий В., Победри Б. Е.** Теория упругости. М. : Мир, 1975.
14. **Работнов Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие. М. : Наука, 1988.
15. **Mindlin R. D., Cheng D. H.** Nuclei of strain in the semi-infinite solid // Journal of Applied Physics. 1950. Vol. 21, iss. 9. P. 926–930.
16. **Алексеев А. С., Белонос А. С., Петренко В. Е.** О концепции междисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. 2001. № 32. С. 81–97.
17. Пособие к СНиП С. 2.09. 03–85. Проектирование подпорных стен и стен подвалов. М. : Стройиздат, 1990.
18. **Карелин Я. А.** Очистка производственных сточных вод предприятий нефтяной промышленности. М. : Гостехиздат, 1953.

*Поступила в редакцию 11.12.2023.*

*После переработки 12.02.2024.*

### Сведения об авторах

**Ялалетдинов Денис Альбертович**, кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Челябинский компрессорный завод», Челябинск, Россия.

**Рахимов Ильдар Раисович**, доктор технических наук, профессор кафедры тракторов, сельскохозяйственных машин и земледелия, Институт агроинженерии, Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия; руководитель Департамента сельскохозяйственных машин ООО «Челябинский компрессорный завод», Челябинск, Россия.

**Куликова Анастасия Павловна**, аспирант, Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия.

**Бычков Игорь Валерьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и электроники, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; e-mail: bychkov@csu.ru.

**Кузьмин Дмитрий Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и электроники, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; e-mail: kuzminda@csu.ru.

**Усик Максим Олегович**, аспирант, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.

**Толкачев Валентин Андреевич**, старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.

## SIMULATION OF SOIL LOOSENING PROCESSES WITH COMPRESSED AIR

D.A. Yalaletdinov<sup>1</sup>, I.R. Rahimov<sup>1,2</sup>, A.P. Kulikova<sup>2</sup>, I.V. Bychkov<sup>3,a</sup>,  
D.A. Kuzmin<sup>3</sup>, M.O. Usik<sup>3</sup>, V.A. Tolkachev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Chelyabinsk Compressor Plant, Chelyabinsk, Russia*

<sup>2</sup>*South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia*

<sup>3</sup>*Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*

<sup>a</sup>*bychkov@csu.ru*

A model for describing soil loosening when exposed to compressed air is considered. The model allows you to calculate, depending on the compressed air pressure, the diameter of the hole and the depth of the feed point, the dilatancy zone (the area within which the created stresses will exceed the threshold and the loosening process will begin). The developed model is also used to describe soil loosening at several air supply points and at different jet directions.

**Keywords:** *modeling of physical processes, tillage, loosening, compressed air.*

## References

1. **Zinck E.** *Method of and device for loosening agriculturally used soil.* Pat. 4429647 USA, US4429647A. 1984.
2. **Kobashi T., Kobashi I., Iwai M.** *Air injection cultivator.* Pat. 4760804 USA, US4760804A. 1988.
3. **Ivkin V.S.** *Gazodinamicheskiy rykhritel' [Gas-dynamic ripper].* Pat. No. 2052032 RF, MKI E 02 F 5/32. Application 12/29/1993; Publ. 01/10/1996. (In Russ.).
4. **Ivkin V.S.** *Gazodinamicheskiy rykhritel' [Gas-dynamic ripper].* Pat. No. 2231601 RF, MKI E 02 F 5/30. Application 03/25/2003; Publ. 06/27/2004. (In Russ.).
5. **Ivkin V.S., Morozov V.V.** *Ustroystvo dlya razrusheniya prochnykh i myorzlykh gruntov [Device for destruction of strong and frozen soils].* Pat. No. 2256751 RF, MKI E 02 F 5/32. Application 04/20/2004; Publ. 07/20/2005. (In Russ.).
6. **Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M.** *Ustroystvo dlya obrabotki pochvy pul'siruyushchim szhатым воздухом [Device for cultivating soil with pulsating compressed air].* Pat. No. 194724 RF, A01B 35/32. Application 03/05/2019; Publ. 05/15/2019. (In Russ.).
7. **Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Akhalaya B.Kh., Starovoytov S.I.** *Avtomatizirovannaya pochvoobrabatyvayushchaya mashina s vysokoturbulentnoy vozduшной струей [Automated tillage machine with a highly turbulent air jet].* Pat. No. 2740583 RF, A01B 79/00. Application 04.09.2020; Publ. 01/15/2021. (In Russ.).  
Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов
8. **Sukhov V.A.** *Opredeleniye davleniya gaza, neobkhodimogo dlya razrusheniya pochvennogo plasta [Determination of the gas pressure required for the destruction of the soil layer].* *Pochvoobrabatyvayushchiye mashiny i dinamika agregatov [Tillage machines and dynamics of aggregates].* Chelyabinsk, Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, 1987. Pp. 113–118. (In Russ.).
9. **Sukhov V.A.** *Izmeneniye davleniya gaza v polosti rabochego organa pri gazodinamicheskom rykhlenii pochvy [Change in gas pressure in the cavity of the working body during gas-dynamic loosening of the soil].* *Pochvoobrabatyvayushchiye*



- mashiny i dinamika agregatov* [Tillage machines and dynamics of aggregates]. Chelyabinsk, Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, 1988. Pp. 34–43. (In Russ.).
10. **Sukhov V.A.** Opredeleniye parametrov sistemy podachi szhatogo gaza impul'snogo gazodinamicheskogo rykhlitelya pochvy [Determination of parameters of the compressed gas supply system for a pulsed gas-dynamic soil ripper]. *Pochvoobrabatyvayushchiye mashiny i dinamika agregatov* [Tillage machines and dynamics of aggregates]. Chelyabinsk, Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, 1989. Pp. 51–59. (In Russ.).
  11. **Sukhov V.A.** Modelirovaniye na EVM protsessa deformirovaniya pochvennogo plasta pri yego gazodinamicheskom rykhlenii [Computer modeling of the process of deformation of the soil layer during its gas-dynamic loosening]. *Pochvoobrabatyvayushchiye mashiny i dinamika agregatov* [Tillage machines and dynamics of aggregates]. Chelyabinsk, Chelyabinsk Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, 1990. Pp. 30–37. (In Russ.).
  12. **Mindlin R.D.** Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. *Physics*, 1936, vol. 7, no. 5, pp. 195–202.
  13. **Novatsky V., Pobedri B.E.** . *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity]. Moscow, Mir Publ., 1975. (In Russ.).
  14. **Rabotnov Yu.N.** *Mekhanika deformiruemogo tvyordogo tela* [Mechanics of deformable solids]. Moscow, Nauka Publ., 1988. (In Russ.).
  15. **Mindlin R.D., Cheng D.H.** Nuclei of strain in the semi-infinite solid. *Journal of Applied Physics*, 1950, vol. 21, no. 9, pp. 926–930.
  16. **Alekseev A.S., Belonosov A.S., Petrenko V.E.** O kontseptsii mnogodistsiplinarnogo prognoza zemletryaseniy s ispol'zovaniyem integral'nogo predvestnika [On the concept of multidisciplinary earthquake forecast using an integral precursor]. *Problemy dinamiki litosfery i seysmichnosti. Vychislitel'naya seysmologiya* [Problems of lithosphere dynamics and seismicity. Computational seismology], 2001, no. 32, pp. 81–97.
  17. Manual for SNiP S. 2.09. 03–85 . *Proektirovaniye podpornykh sten i sten podvalov* [Design of retaining walls and basement walls]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990.
  18. **Karelin Ya.A.** *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod predpriyatiy neftyanoy promyshlennosti* [Treatment of industrial wastewater from oil industry enterprises]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1953.

Article received 11.12.2023.

Corrections received 12.02.2024.