

## О ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ И УПЛОТНЕНИИ ПОЧВЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КРОТОВАТЕЛЯ

Хайдер Раад Надим Аль-Хаззали, В. П. Ковбаса

НУ биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина

На основании проведенного анализа динамики контактного взаимодействия кротователя с почвой установлены компоненты нормальных и сдвиговых напряжений почвы на поверхности контакта. Определены направления и величины уплотнения почвы, а также составляющие сил сопротивления почвы движению кротователя в зависимости от его геометрических параметров, скорости поступательного перемещения и механических свойств почвы. С использованием регрессионных уравнений связи изменения плотности почвы с гидростатическим и максимальным касательным напряжением были получены функции изменения плотности почвы под воздействием кротователя.

**Ключевые слова:** почва, уплотнение, компоненты напряжений, модуль упругости, модуль вязкости, составляющие сил сопротивления, кротователь, геометрические параметры, режимы работы.

**Введение.** Разработка многих процессов, связанных с изменениями свойств почвы при строительстве ирригационных и инженерных сооружений, требует обоснования геометрических параметров и режимов работы рабочих органов, которые применяются для реализации этих процессов. Одним из рабочих органов для осуществления таких процессов является кротователь. При этом используются кротователи различной геометрической формы и размеров. В частности, для прокладки дренажных (оросительных) трубопроводов либо кабелей методом протяжки возникает необходимость образования полости (с целью снижения сопротивления трения протягивания), по которой протягивается коммуникация. Поэтому обоснование геометрических параметров и режимов работы рабочего органа для образования полости является актуальной научной задачей.

**Анализ состояния исследований.** Анализируя состояние исследований взаимодействия рабочих органов с почвой, следует отметить, что наиболее адекватным методом формализации почвы (грунта), который может быть использован для решения задач о нахождении рациональных геометрических форм и режимов движения рабочих органов, является метод, когда почву (грунт) можно представить в виде сплошной деформируемой среды с проявлением таких свойств, как упругость, вязкость и пластичность (Zolotarevskaja, 1997; Kovbasa, 2006; Kulen, & Kuipers, 1986; Kushnarev, 1981). При этом при решении контактных задач взаимодействия рабочих органов с почвой (грунтом) при такой формализации часто бывает достаточно решить задачу в упругой (малая скорость движения рабочего органа) или вязкоупругой постановке. Такие решения позволяют использовать аналитические методы нахождения компонент деформаций, напряжений, составляющих сил сопротивления движению рабочего органа и определять направление изменений плотности почвы или даже сами ее изменения. То есть, решения задачи до наступления пластичности или разрушения сплошности почвы (грунта) позволяет прогнозировать развитие дальнейших процессов изменения ее свойств в зависимости от геометрических параметров и режимов движения рабочего органа.

В связи с этим целью исследования является установление функций изменения плотности почвы и составляющих сил сопротивления движению кротователя в зависимости от его геометрических параметров и скорости движения, а также механических свойств почвы.

**Изложение основного материала.** При решении задачи о взаимодействии кротователя с почвой (грунтом) была принята модель грунта в виде вязкоупругой среды, которая может быть формализована моделью Кельвина-Фойгта. Механическая модель такой среды представлена на рис. 1.

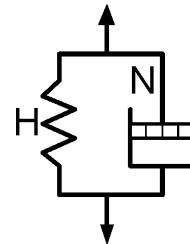


Рис. 1. Механическая модель вязкоупругой среды (почвы)

Согласно этой модели, вследствие приложения нагрузки происходит вязкоупругое деформирование материала, при котором с увеличением скорости приложения нагрузки скорость деформации снижается пропорционально коэффициенту вязкости. При выводе уравнений связи напряжений со скоростями деформирования необходимо просуммировать девиаторные составляющие напряжений упругого и вязкого деформирования. Линейно упругая среда описывается обобщенным законом Гука.

Компоненты девиаторной составляющей закона Гука представляются зависимостями:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_x - \varepsilon); \quad \sigma_y = 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_y - \varepsilon); \\ \sigma_z &= 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_z - \varepsilon); \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \quad \tau_{xz} = G\gamma_{xz}; \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}, \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  – компоненты нормальных и сдвиговых напряжений;  $K$  – объемный модуль упругости;  $K = E/(3(1 - 2\nu))$ ;  $E$  – модуль упругости линейных деформаций;  $G$  – модуль сдвига,  $G = E/(2(1 + \nu))$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\varepsilon = 1/3(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$ , где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – компоненты линейных деформаций;  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  – компоненты сдвиго-

вых деформаций.

Зависимости (1) могут быть выражены через две упругие постоянные следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x(-1+\nu) - (\varepsilon_y + \varepsilon_z)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2}; \\ \sigma_y &= \frac{E(\varepsilon_y(-1+\nu) - (\varepsilon_x + \varepsilon_z)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2}; \\ \sigma_z &= \frac{E(\varepsilon_z(-1+\nu) - (\varepsilon_x + \varepsilon_y)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2}; \\ \tau_{xy} &= \frac{E\gamma_{xy}}{2(1+\nu)}; \tau_{yz} = \frac{E\gamma_{yz}}{2(1+\nu)}; \tau_{xz} = \frac{E\gamma_{xz}}{2(1+\nu)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1), (2) характеризуют поведение упругого элемента модели "Н". Уравнения, которые характеризуют линейную вязкость "N", могут быть выражены зависимостями компонент девиаторных составляющих напряжений со скоростями деформаций такими зависимостями (Kovbasa, 2006):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}) + \sigma; \sigma_y = 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}) + \sigma; \\ \sigma_z &= 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}) + \sigma, \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $\mu_0$  – коэффициент вязкости объемных деформаций,  $\mu_0 = \frac{2}{3} \left( \frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \mu$ ;  $\mu$  – коэффициент вязкости сдвиговых деформаций;  $\dot{\varepsilon} = 1/3(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)$ , где  $\dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$  – компоненты скоростей линейных деформаций.

С учетом введенных обозначений выражения (3) приобретут вид:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_x - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_y))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_y &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_y - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_x))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_z &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_z - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_x))}{-9+18\nu}; \\ \tau_{xy} &= \mu(\dot{\gamma}_{xy}); \tau_{xz} = \mu(\dot{\gamma}_{xz}); \tau_{yz} = \mu(\dot{\gamma}_{yz}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для построения общего уравнения вязкоупругой среды должны быть просуммированы составляющие упругой и вязкой частей модели. Суммы компонент напряжений упругой и вязкой составляющих могут быть записаны с учетом того, что компоненты деформаций и скоростей деформаций можно переписать в виде, удобном для понимания, типа уравнений и удобном для решения, уравнений относительно компонент деформаций:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x[t](-1+\nu) - (\varepsilon_y[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\ &+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon_x[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon_y[t] + \varepsilon_z[t]))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_y &= \frac{E(\varepsilon_y[t](-1+\nu) - (\varepsilon_x[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\ &+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon_y[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon_x[t] + \varepsilon_z[t]))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_z &= \frac{E(\varepsilon_z[t](-1+\nu) - (\varepsilon_x[t] + \varepsilon_y[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\ &+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon_z[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon_x[t] + \varepsilon_y[t]))}{-9+18\nu}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E\gamma_{xy}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\dot{\gamma}_{xy}[t]); \tau_{yz} = \frac{E\gamma_{yz}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\dot{\gamma}_{yz}[t]);$$

$$\tau_{xz} = \frac{E\gamma_{xz}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\dot{\gamma}_{xz}[t]).$$

где:  $\varepsilon_x[t], \varepsilon_y[t], \varepsilon_z[t], \tau_{xy}[t], \tau_{xz}[t], \tau_{yz}[t]$  – компоненты деформаций, которые зависят от времени;  $\varepsilon_x'[t], \varepsilon_y'[t], \varepsilon_z'[t], \gamma_{xy}'[t], \gamma_{xz}'[t], \gamma_{yz}'[t]$  – производные по времени от компонент деформаций.

Решение дифференциальных уравнений (5) относительно компонент деформаций имеет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x[t] &= \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (m_x + E(C_1 + C_2 + C_3)); \\ \varepsilon_y[t] &= \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (m_y + E(C_1 + C_2 + C_3)); \\ \varepsilon_z[t] &= \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (m_z + E(C_1 + C_2 + C_3)); \end{aligned} \quad (6)$$

$$m_x = 3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) + e^{\mu(1+\nu)} E(2C_1 - C_2 - C_3);$$

$$m_y = -3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (-\sigma_y + \nu(\sigma_x + \sigma_z)) - e^{\mu(1+\nu)} E(C_1 - 2C_2 + C_3);$$

$$m_z = -3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (\nu(\sigma_x + \sigma_y) - \sigma_z) - e^{\mu(1+\nu)} E(C_1 + C_2 - 2C_3);$$

$$\gamma_{xy}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_4; \gamma_{yz}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_5;$$

$$\gamma_{xz}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{xz}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_6,$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  – постоянные интегрирования, которые определяются из условия, что при времени  $t = 0$ ,  $\varepsilon_x[t] = \varepsilon_y[t] = \varepsilon_z[t] = 0$ ,  $\gamma_{xy}[t] = \gamma_{xz}[t] = \gamma_{yz}[t] = 0$ , откуда:

$$C_1 = -\frac{\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z}{E}; C_2 = -\frac{-\nu\sigma_x + \sigma_y - \nu\sigma_z}{E};$$

$$C_3 = -\frac{-\nu\sigma_x - \nu\sigma_y + \sigma_z}{E}; C_4 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E};$$

$$C_5 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E}; C_6 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{xz}}{E}.$$

После подстановки постоянных интегрирования в уравнения (6), значения компонент вязкоупругих деформаций будут иметь вид:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}}}{12\eta(1+\nu)^2} \cdot k_x; \dot{\varepsilon}_y = \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}}}{12\eta(1+\nu)^2} \cdot k_y; \dot{\varepsilon}_z = \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}}}{12\eta(1+\nu)^2} \cdot k_z;$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{xy}}{2\eta(1+\nu)}; \dot{\gamma}_{yz} = \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{yz}}{2\eta(1+\nu)}; \dot{\gamma}_{xz} = \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{xz}}{2\eta(1+\nu)}.$$

где:  $k_x = e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ ;

$$k_y = -e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\sigma_x - 2\sigma_y + \sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z);$$

$$k_z = -e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\sigma_x + \sigma_y - 2\sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).$$

Из последних зависимостей компоненты напряжений выразятся следующим образом:

$$\sigma_x = p \cdot (6\dot{\varepsilon}_x - 3(\dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)}{-1+2\nu};$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= p \cdot (-3(\dot{\epsilon}_x - 2\dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\eta(1+\nu)}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \sigma_z &= p \cdot (-3(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y - 2\dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\eta(1+\nu)}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \tau_{xy} &= 2e^{2\eta(1+\nu)}\eta(1+\nu)\dot{\gamma}_{xy}, \tau_{yz} = 2e^{2\eta(1+\nu)}\eta(1+\nu)\dot{\gamma}_{yz}, \\ \tau_{xz} &= 2e^{2\eta(1+\nu)}\eta(1+\nu)\dot{\gamma}_{xz}; p = \frac{4}{9}e^{\frac{2\eta(1+\nu)}{9}}\eta(1+\nu). \end{aligned} \quad (7)$$

Время деформирования  $t$ , которое входит в зависимости связи напряжений со скоростями деформаций, может быть определено по времени распространения волны напряжений. Скорость распространения волны напряжений (Масеруго, 1975):

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}},$$

где  $\lambda = \frac{2}{3}G\left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} - 1\right)$  – коэффициент Ляме.

Время распространения волны:

$$t = \frac{l}{c} = l \sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}} = \sqrt{2}l \sqrt{\frac{G(-1+\nu)}{(1+\nu)^2(-1+2\nu)\rho}}, \quad (8)$$

где  $l$  – расстояние, на котором затухает волна напряжений в данной среде.

Таким образом, уравнения (7) вместе с (8) определяют компоненты напряжений вязкоупругой среды, в виде которой представлена почва (грунт).

Для определения динамических характеристик контактного взаимодействия конусного рабочего органа с почвой (грунтом) необходимо воспользоваться полученными выше физическими уравнениями связи компонент напряжений с компонентами скоростей деформаций. С учетом ранее определенных (Al-Hazaali, & Kovbasa, 2016) компонент скоростей деформаций по уравнениям (7) определяются компоненты напряжений на поверхности контакта рабочий орган – почва. В развернутом виде эти выражения имеют еще более громоздкий, нежели компоненты скоростей деформаций, вид, поэтому привести их полностью в пределах данной статьи не представляется возможным.

Под воздействием изменения напряженно-деформированного состояния почвы (грунта) на границе контакта с рабочим органом происходят изменения плотности самой почвы (грунта). Наиболее известными регрессионными зависимостями, которые связывают изменения плотности почвы с изменением напряжений, являются выражения (Kulen, & Kuipers, 1986; Kushnarev, 1981):

$$\begin{aligned} BVW &= m \ln \left[ \sqrt{\sigma_m^2 + \tau_{\max}^2} \right] + n \cdot \frac{\tau_{\max}}{\sigma_m} + b; \\ \rho_k &= \rho_0 + b \ln[\sigma_m(1 + \tau_{\max})], \end{aligned} \quad (9)$$

где:  $BVW$  – изменение объема почвы, отнесенного к массе  $[M^3/Kg]$ ;  $\rho_k$  – конечная плотность почвы  $[Kg/M^3]$ ;  $\rho_0$  – начальная плотность почвы;  $\sigma_m$  – среднее или гидростатическое напряжение в рассматриваемом объеме;  $\tau_{\max}$  – максимальное касательное напряжение в рассматриваемом объеме;  $m, n, b$  – эмпири-

ческие коэффициенты, которые характерны для определенного типа почвы при различных влажностях и подлежат экспериментальному определению.

Величина гидростатического напряжения определяется как:  $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_z + \sigma_y)/3$ , а величина максимального касательного напряжения для прикладных решений, согласно результатам исследований Новожилова (Novozhilov, 1989), может быть представлена среднеквадратическим компонентом касательных напряжений в виде:  $\tau_{\max} = \sqrt{(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}/3$ . Ис-

пользуя второе из выражений (9) и учитывая то, что для конкретной почвы при определенном ее состоянии величина  $b = const$ , с использованием вышеизложенных результатов можно построить зависимости изменения плотности почвы от ее механических свойств, геометрических параметров кротователя и скорости его движения. Сами зависимости в конечном виде не могут быть приведены в пределах публикации, а графическая интерпретация этих зависимостей представлена на рис. 2.

Анализ изменений плотности почвы (грунта)  $\rho_k$  от действия кротователя свидетельствует о том, что с увеличением радиуса  $r$  основания конуса плотность возрастает нелинейно, причем интенсивность этого возрастания увеличивается с уменьшением остроты конуса кротователя. Увеличение модулей упругости  $E$  и вязкости  $\eta$  почвы приводит к возрастанию плотности, причем рост модуля вязкости ведет к менее интенсивному возрастанию плотности почвы. Аналогичная картина наблюдается с ростом радиуса  $r$  основания конуса и уменьшением его остроты  $a$  (интенсивный рост с увеличением радиуса и уменьшением остроты в начальной части). Как и следовало ожидать, плотность почвы возрастает с ростом скорости  $V_m$  перемещения кротователя, причем эта интенсивность сохраняется постоянной для широкого диапазона значений модуля вязкости  $\eta$ .

Распределения компонент давлений почвы (грунта) на поверхность конусного кротователя могут быть определены из условий равновесия на поверхности:

$$\begin{aligned} dF_x &= \sigma_x l_k + \tau_{xy} m_k + \tau_{xz} n_k; dF_y = \tau_{xy} l_k + \sigma_y m_k + \tau_{yz} n_k; \\ dF_z &= \tau_{xz} l_k + \tau_{yz} m_k + \sigma_z n_k, \end{aligned} \quad (10)$$

где:  $dF_x, dF_y, dF_z$  – проекции на соответствующие оси координат компонент давлений почвы на поверхность кротователя;  $l_k, m_k, n_k$  – направляющие косинусы нормали к поверхности рабочего органа (Al-Hazaali, & Kovbasa, 2016).

Интегрирование выражений (10) по проекциям, перпендикулярным соответствующим индексам компонент давлений, дает величины сил сопротивления движению кротователя в почве (грунте):

$$F_x = \int_{-r}^r \int_{-r}^r dF_x d\eta d\zeta; F_y = \int_{-r}^0 \int_{-r}^0 dF_y d\xi d\zeta; dF_z = \int_{-r}^0 \int_{-r}^0 dF_z d\xi d\eta. \quad (11)$$

Зависимости (11) в конечном виде не могут быть приведены в пределах публикации (вследствие их громоздкости), а графическая интерпретация этих зависимостей представлена на рис. 3, 4.

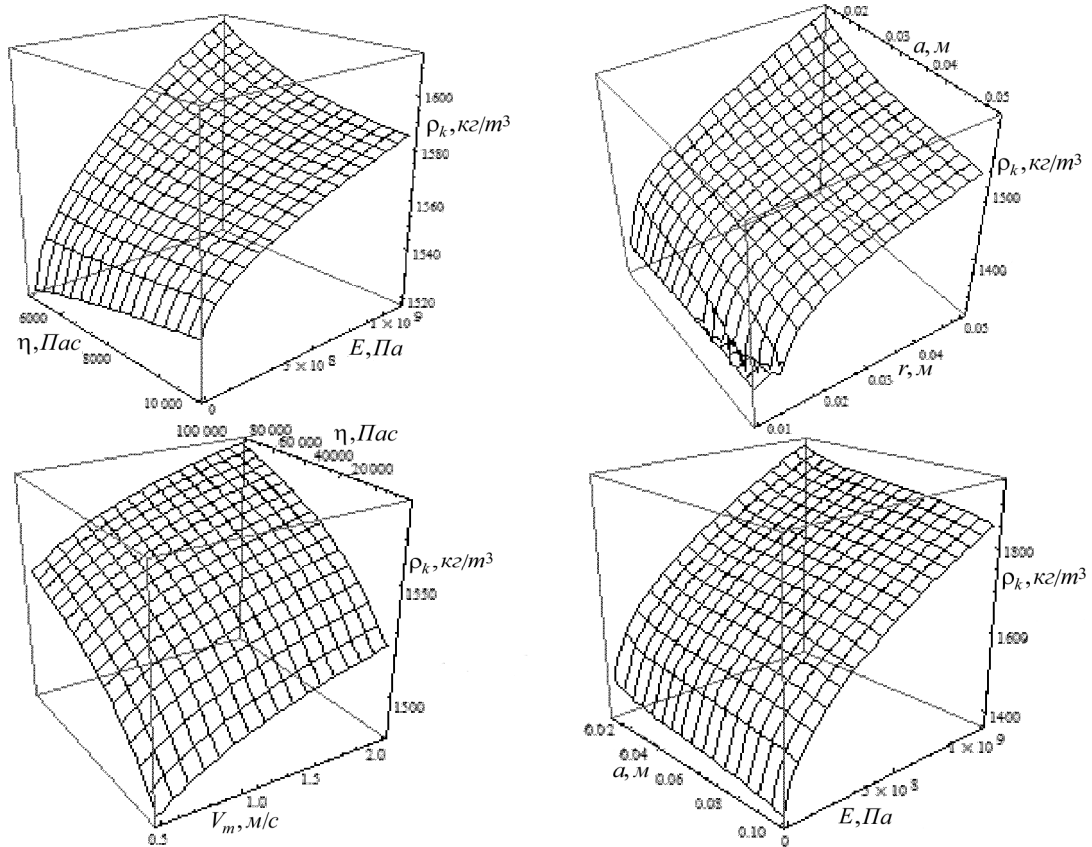


Рис. 2. Характерные графики изменений плотности почвы (грунта)  $\rho_k$  в зависимости от модулей вязкости  $\eta$  и упругости  $E$  почвы, радиуса  $r$  основания конуса, коэффициента, характеризующего его остроту  $a$ , и скорости его перемещения  $V_m$

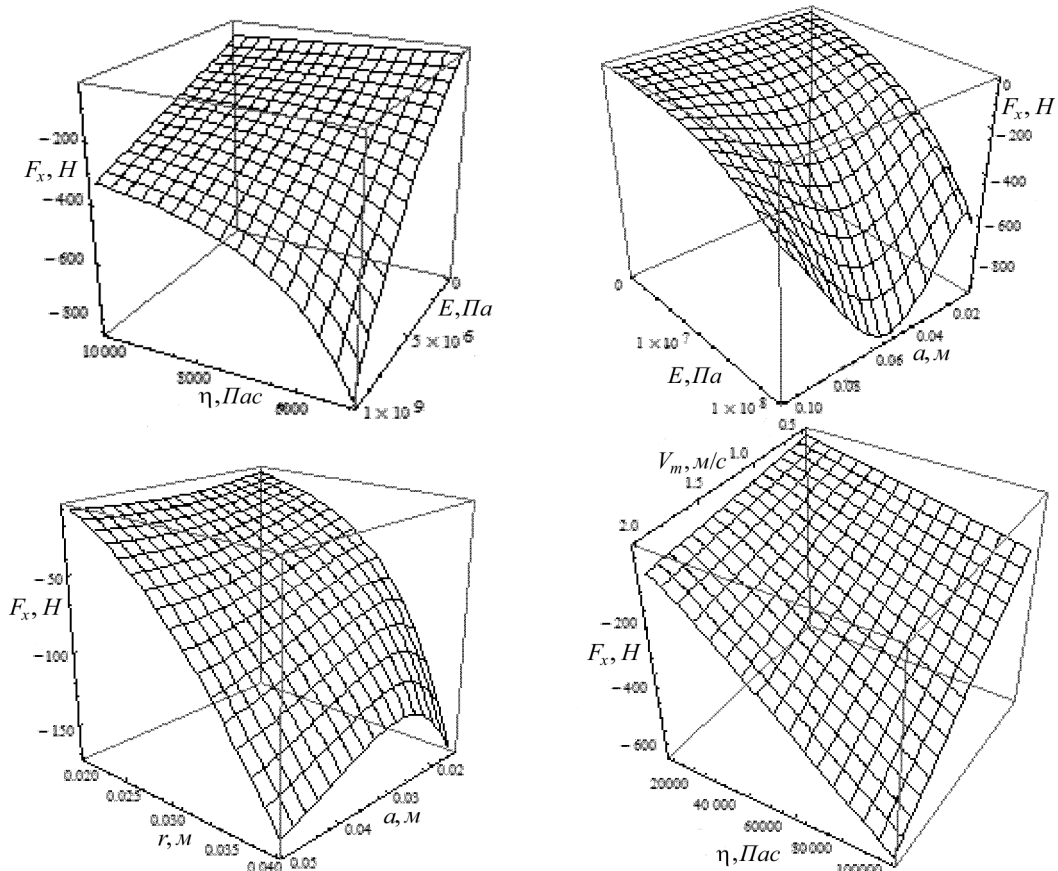
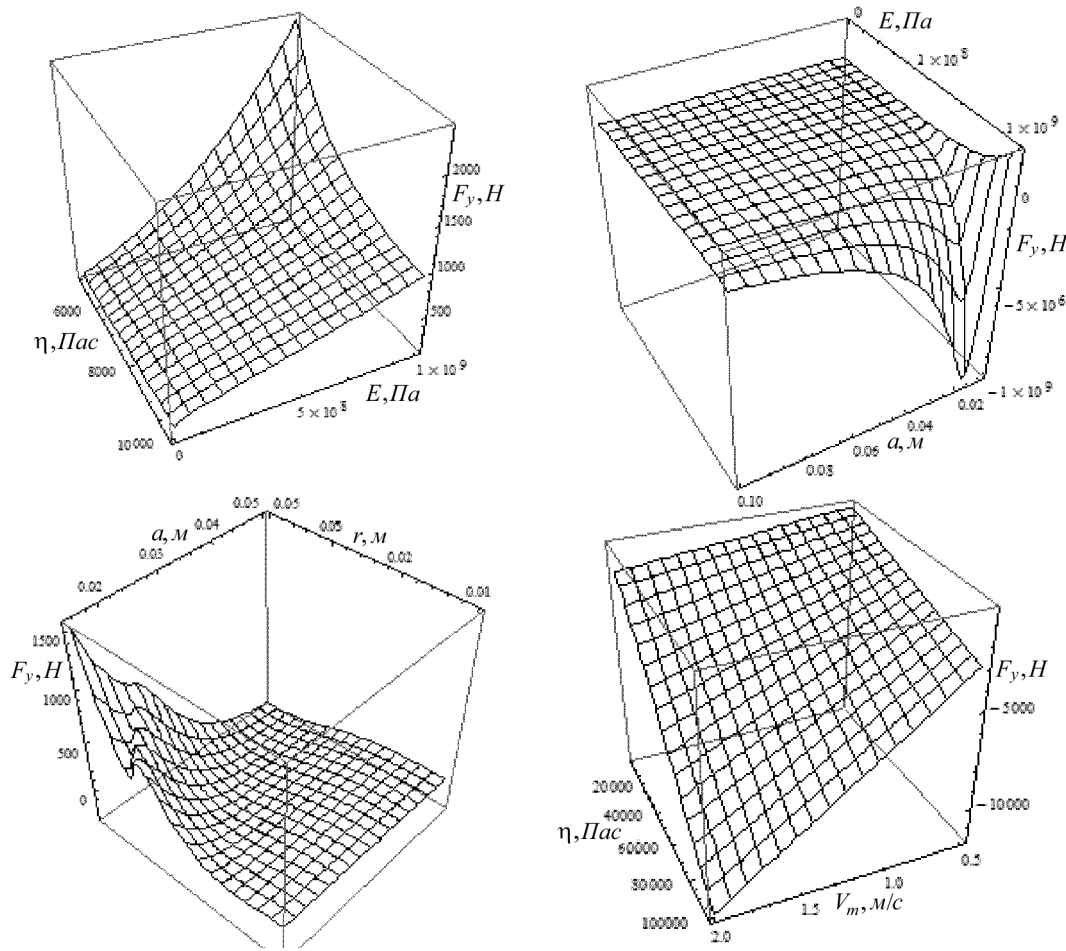


Рис. 3. Характерные графики изменений продольно горизонтальной  $F_x$  составляющей сопротивления движению кротователя в почве (грунте) в зависимости от модулей вязкости  $\eta$  и упругости  $E$  почвы, радиуса  $r$  основания конуса, коэффициента, характеризующего его остроту  $a$ , и скорости его перемещения  $V_m$



**Рис. 4.** Характерные графики изменений поперечно горизонтальной  $F_y$  составляющей сопротивления движению кротователя в почве (грунте) в зависимости от модулей вязкости  $\eta$  и упругости  $E$  почвы, радиуса  $r$  основания конуса, коэффициента, характеризующего его остроту  $a$ , и скорости его перемещения  $V_m$

Следует отметить, что поперечно горизонтальная  $F_y$  и вертикально горизонтальная  $F_z$  составляющие сопротивления движению кротователя являются суммами по модулю сил, действующих в положительном и отрицательном направлениях по осям  $oy$  и  $oz$ , соответственно.

Вследствие симметрии конуса относительно оси  $oz$  составляющая силы сопротивления движению  $F_z$  имеет характер, аналогичный  $F_y$ .

Анализ продольно горизонтальной  $F_x$  составляющей сопротивления движению кротователя в почве (грунте) свидетельствует о том, что с увеличением радиуса  $r$  основания конуса усилие сопротивления возрастает нелинейно, причем интенсивность этого возрастания увеличивается с уменьшением остроты конуса кротователя. Увеличение модулей упругости  $E$  и вязкости  $\eta$  почвы приводит к возрастанию сопротивления движению кротователя, причем рост модуля вязкости ведет к более интенсивному возрастанию сопротивления при начальном увеличении вязкости до величины  $\eta \leq 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , после чего дальнейший рост вязкости не приводит к существенному росту сил сопротивления. Аналогичная картина наблюдается с ростом радиуса  $r$  основания конуса и уменьшением его остроты  $a$  (интенсивный рост с увеличением радиуса

и уменьшением остроты в начальной части). Как и следовало ожидать, сопротивление  $F_x$  возрастает с ростом скорости перемещения кротователя, причем эта интенсивность выше для больших значений модуля вязкости  $\eta$ .

Что касается сил сопротивления движению  $F_y$ , и, аналогично,  $F_z$ , – то увеличение модулей упругости  $E$  и вязкости  $\eta$  приводит к увеличению данных компонент сил сопротивления, причем более интенсивный рост сопротивлений наблюдается при меньших значениях модуля вязкости  $\eta$ , в то время как рост модуля упругости  $E$  ведет к равномерному пропорциональному увеличению сил сопротивления  $F_y$  и  $F_z$ .

Величины сил сопротивления  $F_y$  и  $F_z$  увеличиваются с уменьшением остроты конуса  $a$ , причем более интенсивно эти величины растут при меньших значениях радиуса  $r$  основания конуса.

Составляющие сопротивления  $F_y$  и  $F_z$  возрастают с ростом скорости перемещения кротователя  $V_m$ , причем эта интенсивность выше для меньших значений модуля вязкости  $\eta$ .

**Выводы.** На основании проведенного анализа динамики контактного взаимодействия кротователя с почвой установлены компоненты нормальных и сдвиговых напряжений почвы на поверхности контакта.

Определены направления и величины уплотнения почвы в зависимости от механических свойств почвы, геометрических параметров кротователя и скорости его поступательного перемещения. Определены составляющие сил сопротивления почвы движению кротователя в почве в зависимости от геометрических параметров и скорости его поступательного перемещения, а также механических свойств почвы.

#### Перечень использованных источников

- Al-Hazaali, Hajder Raad Nadim., & Kovbasa, V. P. (2016). On the interaction of the tool with the soil for the formation of the molehill. *Scientific Bulletin of UNFU*, 26(8), pp. 347–355. Retrieved from: [http://nltu.edu.ua/nv/Archive/2016/26\\_8/54.pdf](http://nltu.edu.ua/nv/Archive/2016/26_8/54.pdf). [In Russian].
- Kovbasa, V. P. (2006). *Mehaniko-tehnologichne obgruntuvannja optymizacii vzajemodii robochih organiv z gruntom*. Doctor degree dissertation (05.05.11). Kiev, p. 299. [In Ukrainian].

- Kulen, A., & Kuipers, H. (1986). *Sovremennaja zemledelcheskaja mehanika*. Moscow: Agropromizdat, p. 349. [In Russian].
- Kushnarev, A. S. (1981). *Mehaniko-tehnologicheskie osnovy processa vozdejstvija robochih organov pochvoobrabatyvajushih mashin i orudij na pochvu*. Doctor degree dissertation (05.20.01). Cheljabinsk, Chimjesh, Ukraine, 329 p. [In Russian].
- Macepuro, V. M. (1975). Racionalnaja formula V.P. Gorjachkina i harakter zavisimosti ee kojefficientov ot osnovnyh faktorov, vlijajushih na soprotivlenie pochvy. In *Trudy VIM* (Vol. 69, pp. 11–58). Moscow. [In Russian].
- Novozhilov, V. V. (1989). *Voprosy mehaniki sploshnoj sredy*. St.-Petersburg: Sudostroenie, p. 400. [In Russian].
- Zolotarevskaja, D. I. (1997). *Osnovy teorii i metody rascheta uplotnjajushhego vozdejstvija na pochvu kolesnyh dvizhitelej mobilnoj selskohozjajstvennoj tehniki*. Doctor degree dissertation (05.20.01). Moscow, 432 p. [In Russian].

*Хайдер Раад Надім Аль-Хаззаалі, В. П. Ковбаса*

### ПРО ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ ПІД ВПЛИВОМ РОБОЧОГО ОРґАНУ ДЛЯ УТВОРЕННЯ КРОВОТИНИ

На основі проведеного аналізу динаміки контактної взаємодії робочого органу для утворення кротовини з ґрунтом установлені компоненти нормальних і зсувних напружень ґрунту на поверхні контакту. Визначено напрямки та величини ущільнення ґрунту, а також складники сил опору ґрунту руху робочого органу для утворення кротовини залежно від його геометричних параметрів, швидкості поступального переміщення та механічних властивостей ґрунту. Із використанням регресійних рівнянь зв'язку змін густини ґрунту і гідростатичного та максимального напружень отримано функції змін густини ґрунту під впливом робочого органу для утворення кротовини.

**Ключові слова:** ґрунт, компоненти напружень, модуль пружності, модуль в'язкості, складники сил опору, утворювач кротовин, геометричні параметри, режими роботи.

*Hayder Raad Nadim Al-Hazaali, V. P. Kovbasa*

### ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS AND THE SOIL COMPACTION UNDER THE INFLUENCE OF THE MOLE PLOW

The development of many processes associated with changes in soil properties in the construction of irrigation and civil engineering requires justification of the geometric parameters and modes of operation of the tools, which are used to implement these processes. One of the tools for the implementation of such processes is mole plough. To conduct the research the authors have chosen a model in which the soil is considered as a viscoelastic medium, and can be formalized by Kelvin-Voigt model in solving the task of interaction of mole plough with soil. In the course of research we have built the physical equations that relate the stress components with strain rate taking into consideration modules of elasticity, viscosity and time of loading by using the method of analytical transformations the generalized Hooke's law and the equations for linear connection components of stress with strain rate. The authors obtained the stress components of the soil at the contact surface, depending on its mechanical properties, geometric parameters of the mole plough and its speed of movement. The time of deformation was determined from the equation of speed of passage of the wave stresses in a continuous medium. Application of regression equations that relate the changes in soil density with hydrostatic and maximum tangent stress allowed predicting changes in soil density depending on the geometrical parameters of the mole plough, the speed of its movement and mechanical properties of the soil. Finally, we obtained the components of resistance forces to the movement of mole plough in the soil depending on the mechanical properties of the soil, as well as geometrical parameters and speed of tool movement. To sum up, on the basis of the analysis of the dynamics of contact interaction of mole plough with soil the components of normal and shear stresses of the soil at the contact surface are installed. We have determined the direction and value of soil compaction and components of the resistance forces of the soil the movement of mole plough depending on its geometric parameters, the speed of the translational movement and the mechanical properties of the soil. The change functions of the density of the soil under the influence of the mole plough were obtained.

**Keywords:** soil; compaction; stress components; elastic modulus; modulus of toughness; the components of the resistance forces; mole plough; geometrical parameters; modes of operation.

#### Інформація про авторів:

Аль-Хаззаалі Хайдер Раад Надим, аспірант, НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна;  
В. П. Ковбаса, д-р техн. наук, професор, НУ біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

**E-mail:** kovbasav@ukr.net