

УДК 539.3

DOI 10.17223/19988621/73/8

Т.Р. Рашидов, Н.Б. Джураева, А.П. Уринов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПОЧВЫ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЛУБОКОРЫХЛИТЕЛЯ

При взаимодействии рабочего органа с грунтом почвенная среда меняет свое строение и деформируется. Влияние почвы на поведение рабочего органа можно учитывать через ее плотность и предел прочности. Для описания движения почвы вблизи лапки при конечных деформациях использована модель пластической среды, предложенная академиком Х.А. Рахматулиным, и упрощенные уравнения, полученные на основе гипотезы плоских сечений. Установлено, что в зависимости от коэффициента внутреннего трения и сцепления грунта вблизи рабочего органа рыхлителя может образовываться зона повышенной плотности почвы, где наблюдается значительный рост силы сопротивления.

Ключевые слова: *почвообрабатывающая машина, глубокорыхлитель, рабочий орган, деформация, моделирование, сопротивление почвы, модель сжимаемой пластической среды.*

Практика обработки сельскохозяйственных угодий показывает, что более 50 % подпахотного горизонта подвергается дополнительному уплотнению непосредственно рабочими органами почвообрабатывающих орудий, т.е. образуется «плужная подошва». В связи с этим корни растений не могут пробить уплотнённый слой почвы (плужную подошву) и проникнуть в нижние, более влажные слои.

Предотвращение уплотнения подпахотного горизонта имеет важное значение для обеспечения качественного функционирования почвы и его экологического состояния, поскольку уплотнение подпахотного горизонта является практически постоянным явлением, что снижает урожайность, а также увеличивает вымывание питательных элементов из почвы [1].

Как известно, одним из эффективных приёмов разуплотнения почвы и разрушения «плужной подошвы» является механическое рыхление на глубину до 50 см с помощью глубокорыхлителей, или чизельных плугов, которые широко применяются и в зарубежных странах, таких, как США, Германия, Канада, Румыния и Венгрия. Эти страны занимают одно из передовых мест в области создания и выпуска специальных орудий для глубокого рыхления почвы (собсоилеры, киллиферы и др.).

Согласно исследованиям зарубежных ученых, установлено, что длительная ротационная обработка почвы оказывает негативное влияние на поверхностный слой почвы, причем из-за глобального изменения климата потребление воды в сельском хозяйстве становится все более проблематичным. При рыхлении плотного подпахотного слоя почвы на глубину до 60 см за счет потребления воды водопроницаемость и влагоемкость почвы значительно увеличиваются, благодаря чему боковые корни растений развиваются лучше и урожай получается более полноценным [2].

В Средней Азии в различных почвенно-климатических зонах хлопкосеяния эффективность рыхления подпахотного горизонта изучали М.В. Мухамеджанов

[3, 4], Л.П. Белякова [5], В.А. Сергиенко [6] и др. Физико-механическим и технологическим свойствам почвы, которые необходимо учитывать при создании новых и совершенствовании существующих почвообрабатывающих машин, посвящены работы В.Н. Кузнецовой [7], Г.М. Рудакова [8], А.К. Кашкарова [9], Ф.И. Решетникова [10] и др. В результате проведенных исследований было обнаружено, что глубокое рыхление почвы:

- создает условия для «всасывания», накопления значительных запасов находящейся в почве и воздухе влаги, а также ее перераспределения;
- улучшает микроклимат в почве;
- обеспечивает эффективный влаговоздушный обмен во взрыхленном слое;
- в зоне рыхления увеличивается количество активных корней;
- способствует предотвращению эрозионных процессов;
- за счет разуплотнения почвы в дальнейшем снижается сопротивление при проходе тракторов и других орудий, что ведет к экономии горюче-смазочных материалов, снижаются нагрузки на орудия;
- показывает высокую эффективность борьбы с сорняками.

В результате проникновения в грунтовую среду рабочего органа глубокорыхлителя возникает сила сопротивления почвы, величина которой зависит от физико-механических свойств почвы и конструктивных особенностей рабочего органа глубокорыхлителя. Результаты опытных данных указывают на необходимость учета типа грунта и его свойств при создании новых и совершенствовании существующих почвообрабатывающих машин.

Следует отметить, что ранее разработанные технологические схемы обработки почвы и соответствующие конструкции рабочих органов глубокорыхлителя, работающего в условиях деблокированного резания почвы [11], экспериментальные методы изучения поведения грунтов при статических и динамических воздействиях [12, 13], а также предложенные модели грунтов с использованием метода дискретных элементов [12], позволили достичь определенных успехов в решении задач динамики тел, движущихся в грунтовой среде.

Однако недостаточно изучены вопросы моделирования почвенной среды в процессе взаимодействия ее с рабочими органами глубокорыхлителя, динамические явления в почвенной среде и деталях рыхлителя в процессе нагружения их переменной силой тяги, а также отсутствует научно-обоснованная методика для оценки напряженного состояния деформируемых узлов деталей глубокорыхлителя при взаимодействии с почвенной средой. Перечисленные выше проблемы являются важными, и актуальной задачей является разработка аналитико-численного метода исследования динамики рабочего органа глубокорыхлителя при движении его в почве, моделируемой упругой и сжимаемой пластической средой, и оценки его нагруженности, необходимой для поиска дальнейшего снижения энергоемкости и повышения качественных показателей работы почвообрабатывающей машины.

Таким образом, цель статьи заключается в выборе модели почвенной среды и описании движения рабочего органа глубокорыхлителя (лапы), представленного в виде тонкого кругового конуса, в данной среде.

В представленной работе на базе ранее проведенных исследований выявлены основные факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние почвенной среды, по выбранной модели грунта, определены силы сопротивления почвы и установлен закон движения рабочего органа глубокорыхлителя в грунтовой среде.

1. Описание конструкции и технологического процесса работы основных параметров рабочего органа глубокорыхлителя

В связи с тем, что рыхление подпахотного горизонта представляет собой энергоемкий технологический процесс, для его выполнения используются специальные глубокорыхлители.

На рис. 1 и 2 представлены боковой рабочий орган и схема экспериментального глубокорыхлителя [12].

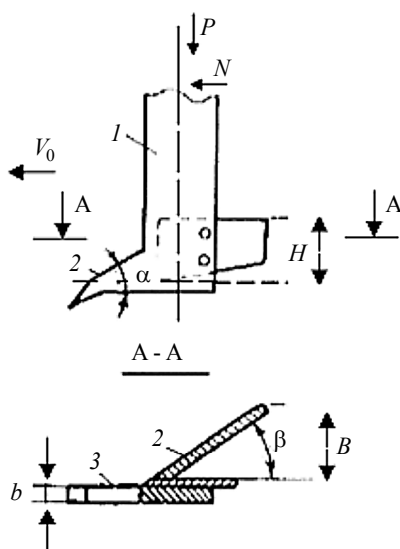


Рис. 1. Боковой рабочий орган глубокорыхлителя
Fig. 1. Side operating element of a subsoiler

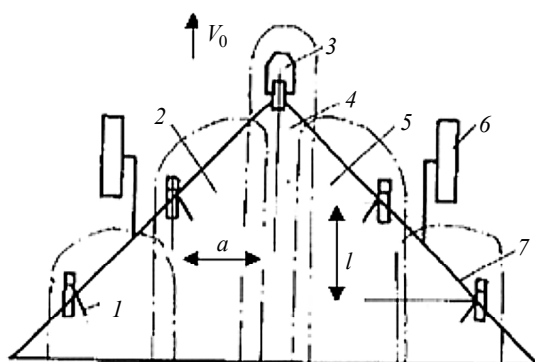


Рис. 2. Схема экспериментального глубокорыхлителя
Fig. 2. Scheme of an experimental subsoiler

Глубокорыхлитель состоит из рамы 7 (рис. 2) и закрепленных на ней последовательно и уступом центрального 3 и боковых 1 рабочих органов, а также опорных колес 6. Центральный рабочий орган орудия выполнен в виде стойки с рых-

лительным элементом (долотом), выполненным в виде горизонтального двухгранного клина с горизонтально-поперечной режущей кромкой, а боковые рабочие органы – в виде односторонних левого и правого рыхлительных клиньев, установленных под углом β к направлению движения (рис. 1).

В данной работе для описания движения рабочего органа глубокорыхлителя (лапы) в грунте принимаем простейшую модель рыхлительной лапы в виде тонкого кругового конуса.

В результате движения тела (рыхлительной лапы) в почвенной среде грунт деформируется и на контактной поверхности обрабатываемых элементов и движущейся части окружающей среды возникает переменная по времени сила взаимодействия (сопротивления), величина которой в первую очередь зависит от динамической структуры почвы, которая подвергается постоянным изменениям из-за широкого спектра биотических и абиотических факторов, таких, как биодegradация [14] и механическое нарушение почвы, рассмотренные в работе [15], и конструктивных особенностей обрабатывающей машины [16]. При этом параметры силовой возможности машин, в конечном счете, определяются характером взаимодействия рабочих органов машин с обрабатываемой грунтовой средой. Поэтому в теоретическом плане особое значение приобретает выбор модели процесса взаимодействия почвенной среды с рабочими органами почвообрабатывающей машины.

3. Модели процесса взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин с грунтовой средой

Авторами [17] получено точное решение для одномерной задачи Римана, которое используется для проверки достоверности результатов модифицированного метода моделирования сжимаемой среды при взаимодействии с твердым телом. Как известно, при решении прикладных задач взаимодействия твердых тел с грунтовой средой, грунт моделируется как упругая или упругопластическая (несжимаемая) среда. Такая модель может быть использована для описания движения водонасыщенных грунтов [18, 19]. Для грунтов малой или средней влажности, то есть состоящих из твердых частиц и воздушных включений, наличие больших объемных необратимых деформаций и наличие сдвиговых деформаций существенны. Такие грунты обычно рассматриваются как пластическая сжимаемая среда.

В данной статье используется модель «пластического газа» академика Х.А. Рахматулина [20]. Согласно этой модели, грунт при нагружении изменяет свою плотность по определенному закону, при разгрузке он сохраняет плотность, полученную при нагружении. В данной работе грунт моделируется как пластическая сжимаемая среда.

Итак, перейдем к составлению уравнения движения грунта, используя «гипотезу плоских сечений», предложенную Х.А. Рахматулиным и А.А. Ильюшиным [21] для решения ряда задач аэродинамики. Согласно этой гипотезе, частицы грунта совершают радиальные движения в плоскости, перпендикулярной оси симметрии твердого тела (конуса). В этом случае задача о движении тела сводится к исследованию движения сжимаемой пластической (сыпучей) среды с цилиндрической симметрией [20]. Принимаем рабочий орган машины приведенным круговым конусом. Пусть конус с профилем $L(r)$, симметричным относительно оси Ox , движется с постоянной скоростью V_0 в направлении, противоположном

этой оси. Рассмотрим произвольное сечение конуса в момент времени t_1 , при котором $L_1 = L(t_1)$ (рис. 3).

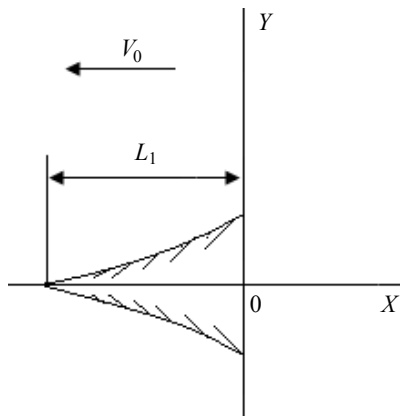


Рис. 3. Схематическое представление движения лапки глубокого рыхлителя в почве
Fig. 3. Schematic representation of the subsoiler foot movement in soil

Примем, что в точке касания вершины конуса рассматриваемого сечения в момент времени $t = t_1$ в грунте возникает цилиндрическая волна сжатия [21] и в момент времени $t > t_1$ граница области возмущенного движения грунта будет ограничена радиусами цилиндрической волны $r = r_*(t)$ и радиусом $r = L(t) \cdot \tan \beta$ (β – угол при вершине кругового конуса), являющимся линией пересечения поверхности конуса с рассматриваемой плоскостью.

Допустим, что плотность грунта меняется только на фронте цилиндрической волны и определяется интенсивностью этой волны. Поэтому плотность грунта в области возмущения является только функцией координаты r и не зависит от времени t . Пусть r – переменная координата Лагранжа. Тогда уравнение движения и неразрывности в цилиндрических координатах в произвольном сечении $L = L_1$ имеет вид

$$\rho_0 r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r + u) \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r - \sigma_\theta) \frac{\partial}{\partial r} (r + u); \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r} (r + u)^2 = \frac{\rho_0}{\rho} r, \quad (2)$$

где r – начальное расстояние частиц от оси конуса; $u = u(r, t)$ – смещение частицы грунта на этом расстоянии; t – время; ρ_0 и ρ – начальная и текущая плотность грунта в возмущенной области $L_1 < r < r_*(t)$; σ_r и σ_θ – радиальные и тангенциальные напряжения. Поскольку грунт моделируется пластической (необратимой) средой [22], то напряжения удовлетворяют условию пластичности Кулона – Мора [23]:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \tau_0 + \mu(\sigma_r + \sigma_\theta), \quad (3)$$

где $\tau_0 = 2k \cdot \cos \theta$ и $\mu = \sin \theta$; k – сцепление; θ – угол внутреннего трения.

Исключив из уравнения (1) σ_0 , приведем его к виду

$$v\sigma_r \frac{\partial(r+u)}{\partial r} + (r+u) \frac{\partial\sigma_r}{\partial r} = \rho_0 r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\tau_0}{1+\mu} \frac{\partial}{\partial r}(r+u). \quad (4)$$

Здесь $v = 2\mu/(1+\mu)$. Умножим обе части уравнения (4) на функцию $(r+u)^{v-1}$ и проинтегрируем по лагранжевой переменной r :

$$(r+u)^v \sigma_r(r, t) = \rho_0 \int_0^r (r+u)^{v-1} r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dr - \frac{\tau_0}{1+\mu} \frac{(r+u)^v - R^v}{v} + R^v \sigma_r(0, t), \quad (5)$$

где $R = v_0 t \operatorname{tg} \beta$ – радиус внутренней границы возмущенной области при лагранжевой переменной $r = 0$ в произвольный момент времени.

Обозначим через $\sigma_r^* = \sigma_r(r_*, t)$ напряжение на фронте цилиндрической волны $r = r_*(t)$, где перемещение частиц равно нулю. Тогда равенство (5) на фронте $r = r_*(t)$ записывается в виде

$$r_*^v \sigma_r^* = \rho_0 \int_0^{r_*} (r+u)^{v-1} r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dr + \frac{\tau_0}{1+\mu} \frac{r_*^v - R^v}{v} + R^v \sigma_r(0, t). \quad (6)$$

Вычитая (6) из (5), получим

$$(r+u)^v \sigma_r(r, t) - r_*^v \sigma_r^* = -\rho_0 \int_r^{r_*} (r+u)^{v-1} r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dr + \frac{\tau_0}{1+\mu} \frac{r_*^v - (r+u)^v}{v}. \quad (7)$$

Учитывая независимость плотности от времени в возмущенной области, проинтегрируем уравнение неразрывности (2):

$$(r+u)^2 = 2\psi(r) + R^2(t), \quad (8)$$

где
$$\psi(r) = \int_0^r \frac{\rho_0}{\rho(r)} r dr.$$

Зная, что $u = 0$ на фронте волны $r = r_*(t)$, из (8) имеем

$$r_*^2 = 2\psi(r_*) + R^2(t), \quad (9)$$

где
$$\psi(r_*) = \int_0^{r_*} b(r) r dr, \quad b = \rho_0 / \rho(r)$$

При постоянной скорости движения конуса $L = v_0 t$ ($R = v_0 t \operatorname{tg} \beta$), тогда, при известном законе $\rho = \rho(r)$, из формулы (9) можно установить закон перемещения фронта цилиндрической волны $r = r_*(t)$.

Дифференцируя (8) по времени, находим скорость и ускорение частиц грунта в области возмущения $L_1 < r < r_*(t)$:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{R \cdot \dot{R}}{\sqrt{2\psi(r) + R^2(t)}},$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\dot{R}^2 + R \cdot \ddot{R}}{\sqrt{2\psi(r) + R^2(t)}} - \frac{R^2 \cdot \dot{R}^2}{[2\psi(r) + R^2(t)]^{3/2}}, \quad (10)$$

где $R = v_0 t \operatorname{tg} \beta$, $\dot{R} = v_0 \operatorname{tg} \beta$, $\ddot{R} = 0$.

Скорость частиц грунта на фронте волны определяем из первого выражения (10), где следует полагать $r = r_*(t)$:

$$\dot{u}_* = \frac{R\dot{R}}{\sqrt{2\psi(r_*) + R^2(t)}} = \frac{R\dot{R}}{r_*}. \quad (11)$$

Для определения напряжения на фронте волны $\sigma_r = \sigma_r^*$ используем закон сохранения массы и теорему о количестве движения [19]:

$$\rho_0 D = \rho(D - \dot{u}_*); \quad (12)$$

$$\rho_0 D \dot{u}_* = -\sigma_r^* - p_a, \quad (13)$$

где D – скорость переднего фронта цилиндрической волны; p_a – давление впереди волны сжатия. Из (12) и (13) находим скорость волны D и напряжение σ_r^* :

$$D = \frac{\dot{u}_*}{1 - b(r_*)}, \quad \sigma_r^* = -\frac{\rho_0 \dot{u}_*^2}{1 - b(r_*)} - p_a.$$

Подставляя ускорение частиц и выражение σ_r^* соответственно из (12) и (13) в (7), находим напряжение в возмущенной области:

$$\begin{aligned} (r+u)^v \sigma_r = \rho_0 (R\ddot{R} + \dot{R}^2) \int_r^{r_*} \frac{rdr}{[2\psi(r) + R(t)]^{1-v/2}} - \rho_0 (R\dot{R})^2 \int_r^{r_*} \frac{rdr}{[2\psi(r) + R(t)]^{2-v/2}} + \\ + \frac{\rho_0}{1 - b(r_*)} \frac{(R\dot{R})^2}{r_*^{2-v}} + \frac{\tau_0}{1 + \mu} [r_*^v - (r+u)^v] + p_a r_*^v. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя выражение (8) в формулу (14), можно установить пространственно-временное распределение напряжения в области возмущения, где необходимо считать известной экспериментально определяемую функцию $\psi(r)$. Если рассматривать процесс распространения волны за малый промежуток времени, то можно полагать плотность грунта за фронтом волны постоянной и равной $\rho = \rho_1 = \text{const}$. Полагая $r = 0$, $u = R(t)$, получаем явное выражение для давления p , возникающего на поверхности конуса:

$$\begin{aligned} p - p_a = \ddot{L} \frac{\rho_0 \cdot \varphi(v, b_1) \cdot x \operatorname{tg}^2 \beta}{b_1} + \\ + \ddot{L}^2 \frac{\rho_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{b_1(v-2)} [(v-2) \cdot \varphi(v, b_1) + b_1(v-2) \cdot a^{v/2} - a^{v/2-1} + 1] + \\ + \varphi(v, b_1) \left[v \cdot p_a + \frac{\tau_0}{(1+\mu)} \right], \end{aligned} \quad (15)$$

где $b_1 = \rho_0 / \rho_1$; $x = L - L_1$; $\varphi(v, b_1) = (a^{v/2} - 1) / v$; $a = 1 / (1 - b_1)$.

По известным значениям напряжений σ_{yy} , σ_{xy} из (9) – (12) и давления p из формулы (15) на поверхности тела, интегрируя их, можно найти контактную силу взаимодействия между почвенной средой и телом.

3. Определение силы сопротивления почвы при движении тела с постоянной скоростью

Значение контактной силы взаимодействия (сила сопротивления), как было отмечено выше, зависит от выбранной модели почвенной среды и конфигурации тела. Найдем выражение этой силы в случае движения тела в виде кругового конуса в сжимаемой пластической среде. Тогда полная сила сопротивления, действующая на поверхность конуса, вычисляется с помощью интеграла (μ_0 – коэффициент трения между грунтом и поверхностью конуса):

$$F = 2\pi(\sin\beta + \mu_0 \cos\beta) \int_0^H (p - p_a) x \operatorname{tg}\beta \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta} dx.$$

Подставим выражение давления из (15) и произведем интегрирование, тогда с учетом $R = H \operatorname{tg}\beta$ получим

$$F = \pi(1 + \mu_0 \operatorname{ctg}\beta) (A + B\rho_0 \dot{L}^2 + \rho_0 C \cdot H \cdot \ddot{H}) \cdot H^2 \operatorname{tg}^2\beta, \quad (16)$$

где
$$A = [p_a + \frac{\tau_0}{v(1+\mu)} (a^{v/2} - 1) \cos^4\beta];$$

$$B = \frac{1}{4b_1(v-2)} \left[\frac{v-2}{v} (a^{v/2} - 1) + b_1(v-2)a^{v/2} - (a^{v/2-1} - 1) \right] \cos^2\beta \sin^2 2\beta;$$

$$C = \frac{1}{6b_1 v} (a^{v/2} - 1) \cos^2\beta \sin^2 2\beta, \quad a = 1/(1-b_1).$$

В случае движения конуса с постоянной скоростью имеем $H = v_0 t$, $\dot{H} = v_0$, $\ddot{H} = 0$. Тогда формула (16) примет вид

$$F = \pi(1 + \mu_0 \operatorname{ctg}\beta) (A + 0.5B\rho_0 v_0^2) v_0^2 t^2 \operatorname{tg}^2\beta. \quad (17)$$

Изменение силы сопротивления от времени по закону (17) имеет место до момента $t = t_0 = v_0 / h_{\text{кон}}$. При $t \geq t_0$ сила сопротивления постоянна и равна

$$F = F_0 = \pi(1 + \mu_0 \operatorname{ctg}\beta) (A + 0.5B\rho_0 v_0^2) h_{\text{кон}}^2 \operatorname{tg}^2\beta. \quad (18)$$

На рис. 4 и 5 (для кривых № 1, 2, 3, 4, 5 при значениях $b_1 = 0,2$, $b_1 = 0,4$, $b_1 = 0,6$, $b_1 = 0,8$ соответственно) представлены графики зависимости силы сопротивления от времени при различных значениях отношения $b_1 = \rho_0 / \rho_1$. В расчетах принято: $\lambda_{\text{лап}} = 10^\circ$, $\beta_{\text{лап}} = 10^\circ$, $k = 50000 \text{ Н/м}^2$, $\theta = 30^\circ$, $\rho_0 = 2000 \text{ кг/м}^3$, $v_0 = 2.777 \text{ м/с}$ (10 км/ч), $\mu_0 = 0.2$, $h_{\text{лап}} = h_{\text{кон}} = 0.2 \text{ м}$.

Как видно из графиков, пока площадь контакта конуса с грунтом переменная, сила сопротивления зависит от времени по параболическому закону, и далее она остается постоянной. Рост отношения $b_1 = \rho_0 / \rho_1$, что соответствует более уплотненному состоянию грунта за фронтом цилиндрической волны, приводит к значи-

тельному увеличению значения силы сопротивления. На рис. 5 показаны аналогичные зависимости в случае моделирования грунта при отсутствии внутреннего трения ($\theta = 0$). Видно, что увеличение угла внутреннего трения θ приводит к некоторому снижению силы сопротивления.

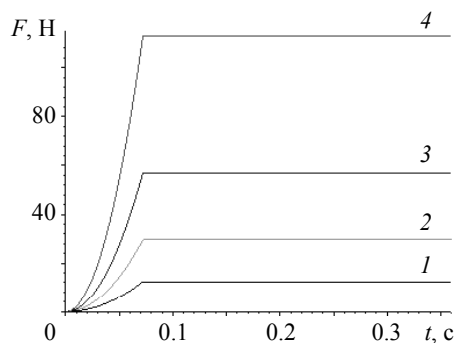


Рис. 4. График зависимости силы сопротивления грунта F от времени t при различных значениях отношения $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ ($\theta = 0$)

Fig. 4. Dependence of the soil resistance force F on time t for different values of the ratio $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ ($\theta = 0$)

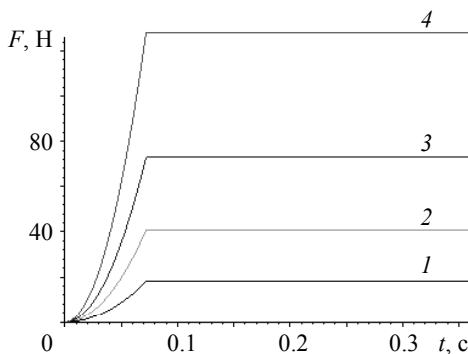


Рис. 5. График зависимости силы сопротивления грунта F от времени t при различных значениях отношения $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ ($\theta \neq 0$)

Fig. 5. Dependence of the soil resistance force F on time t for different values of the ratio $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ ($\theta \neq 0$)

Полная сила сопротивления, действующая на поверхность конуса, вычисляется с помощью интеграла (μ_0 – коэффициент трения между грунтом и поверхностью конуса):

$$F = 2\pi(\sin \beta + \mu_0 \cos \beta) \int_0^h (p - p_a) x \operatorname{tg} \beta \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} dx.$$

Подставим выражение давления из (15) и произведем интегрирование, тогда, с учетом $R = L \operatorname{tg} \beta$, получим

$$F = \pi(1 + \mu_0 \operatorname{ctg} \beta) (A + B \rho_0 \dot{L}^2 + \rho_0 C \cdot h \cdot \ddot{L}) h^2, \quad (18)$$

где

$$A = \pi \operatorname{tg}^2 \beta \left[p_a + \frac{\tau_0}{v(1 + \mu)} \right] (a^{v/2} - 1);$$

$$B = \frac{\pi \operatorname{tg}^4 \beta}{b_1(v-2)} \left[\frac{v-2}{v} (a^{v/2} - 1) + b_1(v-2) a^{v/2} - (a^{v/2-1} - 1) \right];$$

$$C = \frac{\pi \operatorname{tg}^4 \beta}{3b_1 v} (a^{v/2} - 1), \quad a = 1/(1 - b_1).$$

В случае движения конуса с постоянной скоростью имеем $L = v_0 t$, $\dot{L} = v_0$, $\ddot{L} = 0$. Тогда формула (17) примет вид

$$F = (1 + \mu_0 \operatorname{ctg} \beta) (A + B \cdot \rho_0 v_0^2) h^2. \quad (19)$$

На рис. 6 и 7 (для кривых 1, 2, 3, 4 при значениях $\mu = 0$, $\mu = 0.5$, $\mu = 0.7$, $\mu = 0.9$) представлены графики изменения силы сопротивления в зависимости от b_1 ($b_1 = \rho_0 / \rho_1$) для двух значений угла λ и при различных значениях параметра грунта $\mu = \sin \theta$. В расчетах принято: $\beta_{\text{лап}} = 20^\circ$, $k = 50000 \text{ Н/м}^2$, $\rho_0 = 2000 \text{ кг/м}^3$, $v_0 = 2.777 \text{ м/с}$ (10 км/ч), $\mu_0 = 0.2$, $h_{\text{лап}} = h_{\text{кон}} = 0.2 \text{ м}$.

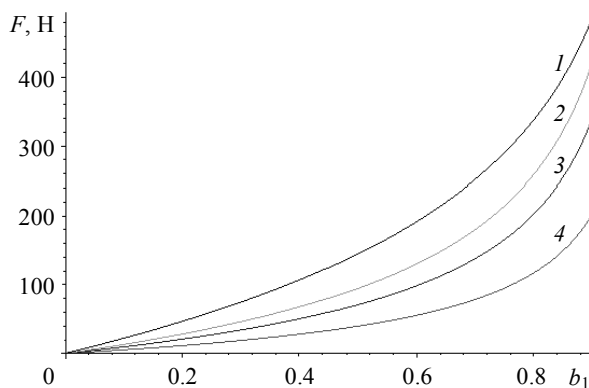


Рис. 6. Зависимости силы сопротивления грунта F от отношения $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ при $\lambda = 10^\circ$ и для различных значений параметра $\mu = \sin \theta$

Fig. 6. Dependence of the soil resistance force F on the ratio $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ at $\lambda = 10^\circ$ and different values of the parameter $\mu = \sin \theta$

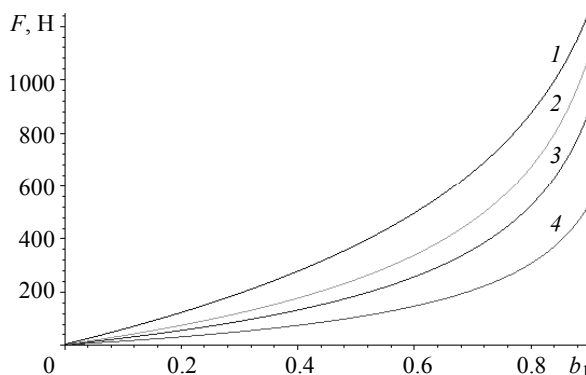


Рис. 7. Зависимости силы сопротивления грунта F от отношения $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ при $\lambda = 20^\circ$ и для различных значений параметра $\mu = \sin \theta$

Fig. 7. Dependence of the soil resistance force F on the ratio $b_1 = \rho_0 / \rho_1$ at $\lambda = 20^\circ$ and different values of the parameter $\mu = \sin \theta$

Как видно из графиков, с ростом отношения $b_1 = \rho_0 / \rho_1$, который соответствует более уплотненному состоянию грунта за фронтом цилиндрической волны, значительно увеличивается сила сопротивления F . С другой стороны, увеличение угла внутреннего трения θ приводит к некоторому снижению силы сопротивления.

4. Выводы

Для описания динамики обрабатываемой почвы выбрана модель сжимаемой пластической среды с условием Кулона – Мора. При использовании данной модели определена сила сопротивления почвенной среды при движении в ней лапы глубокорыхлителя, представленной в виде тонкого кругового конуса. Установлено, что величина этой силы существенно зависит от свойства грунта, вида контактных условий между телом и грунтом, причем с ростом коэффициента внутреннего трения μ сила сопротивления грунта F увеличивается.

Получена зависимость силы сопротивления от времени. По результатам графоаналитических исследований видно, что пока площадь контакта кругового конуса с грунтом переменная, сила сопротивления в зависимости от времени меняется по параболическому закону, и далее она остается постоянной. В случае движения тела с постоянной скоростью установлено, что в зависимости от коэффициента внутреннего трения и сцепления грунта вблизи рабочего органа рыхлителя может образовываться зона повышенной плотности почвы, где наблюдается значительный рост силы сопротивления. При увеличении угла внутреннего трения наблюдается некоторое снижение значения силы сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thorsøe M.H., Noe E.B., Lamandé M., Frelüh-Larsen A., Kjeldsen C., Zandersen M., Schjøning P. Sustainable soil management – Farmers’ perspectives on subsoil compaction and the opportunities and barriers for intervention // *Land Use Policy*. 2019. V. 86. P. 427–437. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.05.017.
2. Kuang N., Tan D., Li H., Gou Q., Li Q., Han H. Effects of subsoiling before winter wheat on water consumption characteristics and yield of summer maize on the North China Plain // *Agricultural Water Management*. 2020. V. 227. Article 105786. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105786.
3. Мухамеджанов М.В. Система земледелия по коренному повышению плодородия орошаемых почв и урожайности сельскохозяйственных культур. Ташкент: ФАН, 1974. С. 3–23.
4. Мухамеджанов М.В., Сулейманов С. Корневая система и урожайность хлопчатника. Ташкент: Узбекистан, 1978. 328 с.
5. Белякова Л.П., Асроров М. Эффективность почвоуглубления орошаемых почв // *Хлопководство*. 1959. № 2. С. 35–38.
6. Сергиенко В.А., Байметов Р.И., Ибрагимов Р.И., Бибуттов Н. Рациональная технология глубокого рыхления почвы // *Хлопководство*. 1982. № 10. С. 49–53.
7. Кузнецова В.Н. Физическое моделирование процесса контактного взаимодействия рабочего органа землеройной машины с мерзлым грунтом // *Вестник Томского Государственного университета. Математика и механика*. 2019. № 61. С. 70–81. DOI: 10.17223/19988621/61/7.
8. Рудаков Г.М. Технологические основы механизации сева хлопчатника. Ташкент: Фан, 1974. 244 с.
9. Кашкаров А.К., Джураев А. Глубокое рыхление как средство борьбы с плужной по-
дошвой // 1964. № 2. С. 16–18.

10. Решетников Ф.И. Приемы увеличения мощности пахотного слоя орошаемого серозема. Ташкент: Изд-во УзАСХН, 1960. 102 с.
11. Тухтакузиев А. Механико-технологические основы эффективности работы почвообрабатывающих машин хлопководческого комплекса: автореф. дис. ... д.т.н. Янгиюль, 1998. 16 с.
12. Chengguang Hang, Yuxiang Huang, Ruixiang Zhu. Analysis of the movement behaviour of soil between subsoilers based on the discrete element method // Journal of Terramechanics. 2017. V. 74. P. 35–43. DOI: 10.1016 / j.jterra.2017.10.002.
13. Байметов Р.И. Глубокорыхлитель // Механизация хлопководства. 1982. № 1. С. 3–4.
14. Гросс Е.Е., Кокорева А.А., Кулижский С.П. и др. Исследование изменения прочности агрегатов почв при различных сельскохозяйственных нагрузках // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 368. С. 180–185.
15. Julius Diel, Hans-Jörg Vogel, Steffen Schlüter. Impact of wetting and drying cycles on soil structure dynamics // Geoderma. 2019. V. 345. P. 63–71. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.03.018
16. Rashidov T., Djuraeva N.B. Ripper foot movement in the ground, simulated H.A. Rahmatulin's environment // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. (www.ijarset.com) Of IJARSET. 2019. V. 6. Iss. 9. P. 10906–10912.
17. Feng Z.W., Kaboudian A., Rong J.L., Khoo B.C. The simulation of compressible multi-fluid multi-solid interactions using the modified ghost method // Computers & Fluids. 2017. V. 154. P. 12–26. DOI: 10.1016 / j.compfluid.2017.05.017
18. Мардонов Б. Волновые процессы в упруго пористых средах. Ташкент: Изд-во ФАН, 1989. 175 с.
19. Da Costa Mattos H.S., Teixeira L.P., Martins-Costa M.L.. Analysis of small temperature oscillation in a deformable solid matrix containing a spherical cavity filled with a compressible liquid – Analytical solution for damage initiation induced by pore pressure variation // International Journal of Engineering Science. 2018. V. 129. P. 1–20. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2018.02.014.
20. Рахматулин Х.А. Газовая и волновая динамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. 196 с.
21. Ильюшин А.А. Закон плоских сечений в аэродинамике больших сверхзвуковых скоростей // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. Вып. 6. С. 733–755.
22. Рахматулин Х.А., Сагомонян А.Я., Алексеев Н.А. Вопросы динамики грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 239 с.
23. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Физматгиз, 1960. 121 с.

Статья поступила 09.01.2020

Rashidov T.R., Djuraeva N.B., Urinov A.P. (2021) MODELING THE PROCESS OF STRAIN AND MOTION OF THE SOIL IN A SUBSOILER OPERATION AREA. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 73. pp. 81–94

DOI 10.17223/19988621/73/8

Keywords: tillage machine, subsoiler, operating element, strain, modeling, soil resistance, model of a compressible plastic medium.

Analysis of available literature shows that nowadays an advanced scheme of the technological process and new designs of operating elements of the subsoiler working in conditions of deblocked cutting has been developed. The aim is to improve the quality and to reduce the energy consumption by machines and equipment during deep tillage. However, at present, the theory of vibrations and strength loading of the units of subsoiler, when its operating elements interact with soil, is not sufficiently developed. This paper highlights the issues regarding the modeling of soil during interaction with operating elements of a subsoiler. Based on the use of the Rakhmatulin model of a compressible plastic medium and the Ilyushin «flat cross-section hypotheses», the equation of the soil motion is formulated, and the dynamic phenomena occurring in the soil and

subsoiler elements under variable traction are described. The calculation results are obtained in the Maple-8 programming environment using the methods of solid mechanics and soil mechanics.

Tursunbay R. RASHIDOV (Doctor of Technical Sciences, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the ASRU, Tashkent, Uzbekistan). E-mail: tur.rashidov@list.ru

Nargiza B. DJURAEVA (Junior Research Scientist, Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the ASRU, Tashkent, Uzbekistan). E-mail: nargiza.1968@mail.ru

Aziz P. URINOV (Junior Research Scientist, Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the ASRU, Tashkent, Uzbekistan). E-mail: PhD.mr.Urinov@mail.ru

REFERENCES

1. Thorsøe M.H., Noe E.B., Lamandé M., Frelüh-Larsen A., Kjeldsen C., Zandersen M., Schjøning P. (2019) Sustainable soil management – Farmers' perspectives on subsoil compaction and the opportunities and barriers for intervention. *Land Use Policy*. 86. pp. 427–437. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.05.017.
2. Kuang N., Tan D., Li H., Gou Q., Li Q., Han H. (2020) Effects of subsoiling before winter wheat on water consumption characteristics and yield of summer maize on the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 227. Article 105786. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105786.
3. Mukhamedzhanov M.V. (1974) *Sistema zemledeliya po korennomu povysheniyu plodorodiya oroshaemykh pochv i urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Agricultural system for radical improvement of the fertility of irrigated soils and crop yields]. Tashkent: FAN. pp. 3–23.
4. Mukhamedzhanov M.V., Suleymanov S. (1978) *Kornevaya sistema i urozhaynost' khlopchatnika* [Root system and yield of cotton plants]. Tashkent: Uzbekistan.
5. Belyakova L.P., Asrorov M. (1959) Effektivnost' pochvougлубleniya oroshaemykh pochv [Efficiency of irrigated soil dredging]. *Khlopkovodstvo*. 2. pp. 35–38.
6. Sergienko V.A., Baymetov R.I., Ibragimov R.I., Bibutov N. (1982) Ratsional'naya tekhnologiya glubokogo rykhleniya pochvy [Efficient technology of deep soil loosening]. *Khlopkovodstvo*. 10. pp. 49–53.
7. Kuznetsova V.N. (2019) Fizicheskoe modelirovanie protsessa kontaktnogo vzaimodeystviya rabocheho organa zemleroy noy mashiny s myorzlym gruntom [Physical modeling of the contact interaction between working body of digging machine and frozen soil]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 61. pp. 70–81. DOI: 10.17223/19988621/61/7.
8. Rudakov G.M. (1974) *Tekhnologicheskie osnovy mekhanizatsii seva khlopchatnika* [Technological foundations of mechanization of cotton sowing]. Tashkent: FAN.
9. Kashkarov A.K., Dzhuraev A. (1964) Glubokoe rykhlenie kak sredstvo bor'by s pluzhnoy podoshvoy [Deep loosening as means of dealing with plow sole]. *Khlopkovodstvo*. 2. pp. 16–18.
10. Reshetnikov F.I. (1960) *Priyomy uvelicheniya moshchnosti pakhotnogo sloya oroshaemogo serozyoma* [Methods for increasing the capacity of an arable layer of irrigated sierozem]. Tashkent: UzASKhN.
11. Tukhtakuziev A. (1998) *Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy effektivnosti raboty pochvoo-brabatyvayushchikh mashin khlopkovodcheskogo kompleksa* [Mechanical and technological principles of the efficiency of tillage machines in cotton-growing complex]. Thesis. Yangiyul'.
12. Hang C., Huang Y., Zhu R. (2017) Analysis of the movement behaviour of soil between sub-soilers based on the discrete element method. *Journal of Terramechanics*. 74. pp. 35–43. DOI: 10.1016/j.jterra.2017.10.002.
13. Baymetov R.I. (1982) Glubokorykhritel' [Subsoiler]. *Mekhanizatsiya khlopkovodstva*. 1. pp. 3–4.

14. Gross E.E., Kokoreva A.A., Kulizhskiy S.P., Nikolaeva E.I., Solov'eva T.P. (2013) Issledovanie izmeneniya prochnosti agregatov pochv pri razlichnykh sel'skokhozyaystvennykh nagruzkakh [Study of the strength variation in soil aggregates under various agricultural loads]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 368. pp. 180–185.
15. Diel J., Vogel H.-J., Schlüter S. (2019) Impact of wetting and drying cycles on soil structure dynamics. *Geoderma*. 345. pp. 63–71. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.03.018.
16. Rashidov T., Djuraeva N.B. (2019) Ripper foot movement in the ground, simulated H.A. Rahmatulin's environment. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 6(9). pp. 10906–10912.
17. Feng Z.W., Kaboudian A., Rong J.L., Khoo B.C. (2017) The simulation of compressible multi-fluid multi-solid interactions using the modified ghost method. *Computers & Fluids*. 154. pp. 12–26. DOI: 10.1016/j.compfluid.2017.05.017.
18. Mardonov B. (1989) *Volnovye protsessy v uprugoy poristykh sredakh* [Wave processes in elastic porous media]. Tashkent: FAN.
19. Da Costa Mattos H.S., Teixeira L.P., Martins-Costa M.L. (2018) Analysis of small temperature oscillation in a deformable solid matrix containing a spherical cavity filled with a compressible liquid – Analytical solutions for damage initiation induced by pore pressure variation. *International Journal of Engineering Science*. 129. pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2018.02.014.
20. Rakhmatulin Kh.A. (1983) *Gazovaya i volnovaya dinamika* [Gas and wave dynamics]. Moscow: Moscow State University Publishing.
21. Il'yushin A.A. (1956) Zakon ploskikh secheniy v aerodinamike bol'shikh sverkhzvukovykh skorostey [The law of flat sections in aerodynamics of high supersonic speeds]. *Prikladnaya matematika i mekhanika – Applied Mathematics and Mechanics*. 20(6). pp. 733–735.
22. Rakhmatulin Kh.A., Sagomonyan A.Ya., Alekseev N.A. (1964) *Voprosy dinamiki gruntov* [Issues on soil dynamics]. Moscow: Moscow State University Publishing.
23. Sokolovskiy V.V. (1960) *Statika sypuchey sredy* [Statics in a loose medium]. Moscow: Fizmatgiz.

Received: January 9, 2020