

УДК 629.114.2

В.Н. Лобанов

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГУСЕНИЧНЫХ ЛЕСНЫХ МАШИН СО СЛАБЫМИ ГРУНТАМИ

Получены формулы для определения плотности грунта и скорости перемещения его частиц между движителем и фронтом волны с учетом времени протекания процесса.

Ключевые слова: гусеничные лесные машины, почва, слабый грунт, нормальное напряжение сжатия, плотность грунта, фронт волны, скорость движения частиц грунта, давление гусеницы, опорная длина и ширина гусеницы.

Механизм взаимодействия гусеничных лесных машин со слабым грунтом значительно сложнее, чем у обычной гусеничной техники (транспортной, сельскохозяйственной, экскаваторной). Это объясняется сложными условиями работы лесных машин, которые вызывают резкие изменения нагрузок, действующих как в узлах технологического оборудования, так и непосредственно на почву. В процессе работы колебания корпуса лесных машин, возникающие при их движении по неровной поверхности лесосеки, приводят к дополнительному увеличению давления гусеницы на почву и изменению поля напряжений в толще грунта. При этом переуплотнение почвы происходит не только в верхних слоях, но и на глубине.

Определение основного параметра механики грунтов – нормального напряжения сжатия – представляет собой сложную задачу, особенно, для случаев динамического нагружения, которые характеризуются небольшим временем воздействия.

Процессы взаимодействия гусеничных машин со слабыми лесными почвами описывают без учета изменения их физико-механических свойств и продолжительности процесса.

Цель нашей работы – определить плотность и скорость деформации почвы с учетом положений волновой теории деформации при изменении ее параметров.

В случае одномерных движений с цилиндрическими и плоскими волнами основными искомыми функциями являются в общем случае компоненты тензора напряжения, плотность, или объемная деформация грунта, и скорость частиц, а определяющими параметрами – константы, входящие в уравнения движения и в граничные и начальные условия задачи. Координатная ось Z совпадает с направлением движения частиц грунта.

Основные уравнения, описывающие вертикальное движение частиц грунта в переменных Эйлера, имеют следующий вид [1, 3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{vV\rho}{z} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial z} \right) - \frac{\partial \sigma_1}{\partial z} - v \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{z} = 0 \end{array} \right. , \quad (1)$$

где ρ – плотность грунта;

V – скорость перемещения частиц грунта;

v – коэффициент, зависящий от формы движителя (для плоской – $v = 0$, для цилиндрической – $v = 1$, для сферической – $v = 2$);

$\sigma_{1,2}$ – напряжения, возникающие в грунте.

При движении лесных гусеничных машин по лесосеке грунт под движителем изменяет свою форму и объем. В толще грунта под движителем возникает волна деформации [3], под действием которой частицы грунта перемещаются вниз вдоль оси Z .

Изменение массы грунта, содержащейся в охваченном действием волны объеме, равно разности потоков массы грунта, входящего через площадку S , перпендикулярную координатной оси Z , и выходящего через параллельную ей грань.

Уравнение непрерывности для данного случая запишем в виде [4]

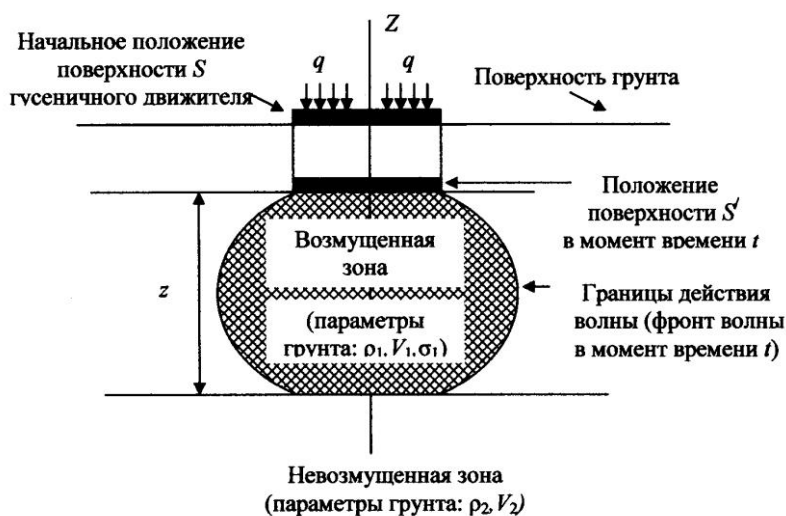
$$\Delta \rho u = \rho_2 V_2 - \rho_1 V_1, \quad (2)$$

где $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$;

ρ_1 и ρ_2 – плотность грунта сзади и перед фронтом волны;

u – скорость волны;

V_1 и V_2 – скорость частиц грунта сзади и перед фронтом волны.



Изменение напряжения в выделенном объеме грунта под действием волны (см. рисунок) описывается уравнением

$$[(\rho V)_2 - (\rho V)_1]u = \sigma_2 + (\rho V^2)_2 - \sigma_1 - (\rho V^2)_1. \quad (3)$$

Здесь σ_1 и σ_2 – напряжения, возникающие в грунте сзади и перед фронтом волны.

Так как перед фронтом волны находится невозмущенная среда, то ее характеризуют следующими параметрами:

$$\rho_2 = \rho_0; V_2 = 0; \sigma_2 = 0.$$

Поэтому уравнения (1) и (2), сведенные в систему (3), принимают вид

$$\begin{cases} (\rho_1 - \rho_0) u = \rho_1 V_1 \\ \rho_1 V_1 u = \sigma_1 + \rho_1 V_1^2 \end{cases} \quad (4)$$

Решаем полученную систему уравнений относительно ρ_1 , подставив значение u из первого уравнения во второе:

$$\frac{\rho_1^2 V_1^2}{\rho_1 - \rho_0} - \rho_1 V_1^2 = \sigma_1. \quad (5)$$

После преобразований (5) получаем выражение для определения плотности грунта ρ_1 в его толще после прохода машины, т.е. плотности грунта между движителем и фронтом волны:

$$\rho_1 = \frac{\sigma_1 \rho_0}{\sigma_1 - \rho_0 V_1^2}. \quad (6)$$

Напряжение σ_1 в толще грунта между движителем и фронтом волны определяем по уравнению [2]:

$$\sigma_1 = \frac{Lb}{Lb + \mu \left(-b \frac{z}{\mu} + \frac{1}{\mu} z^2 \right)} q, \quad (7)$$

где L и b – опорная длина и ширина гусеницы, м;

μ – коэффициент Пуассона для грунтов;

z – глубина, на которую распространяется фронт волны, $z = 2b$, м;

q – давление гусеницы на поверхность грунта, Н/м².

В общем случае скорость V_1 перемещения частиц грунта за фронтом волны зависит от относительной деформации грунта. Для определения V_1 рассмотрим уравнения системы (1), которые описывают поведение грунта, расположенного между движителем, движущимся со скоростью V_0 , и фронтом волны [1].

Так как относительная деформация грунта изменяется в пределах от 0 до 1, то его плотность в пространстве между гусеничным движителем и

волной можно считать практически постоянной. Тогда первое уравнение системы (1) принимает вид

$$\rho \frac{\partial V_1}{\partial z} + \frac{\gamma}{z} \rho V_1 = 0$$

или с учетом, что $\rho \neq 0$:

$$\frac{\partial V_1}{\partial z} + \frac{\gamma}{z} V_1 = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) с граничным условием

$$V_0 = V_1(z = V_0 t) \text{ при } t \geq 0, \quad (9)$$

находим скорость:

$$V_1(z, t) = V_1(t) V_1(z), \quad (10)$$

где $V_1(t) \neq 0$.

Подставляя (10) в (8) и решая его относительно функции $V_1(z)$, получаем уравнение

$$\frac{dV_1}{dz} + \frac{\gamma}{z} V_1(z) = 0 \text{ или } \frac{dV_1(z)}{V_1(z)} + \nu \frac{dz}{z} = 0. \quad (11)$$

Из (9) видно, что $V_1(z, t)$ – убывающая по z функция, так как $\frac{dV_1}{dz} < 0$.

Интегрируя уравнение (11), имеем

$$\ln V_1(z) + \ln z^\nu = \ln c \text{ или } V_1(z) = \frac{c}{z^\nu}, \quad (12)$$

где c – постоянная интегрирования.

Подставляя выражение $V_1(z)$ в уравнение (10), получаем

$$V_1(z, t) = \frac{c V_1(t)}{z^\nu}. \quad (13)$$

Используя граничные условия (9) $z = V_0 t$, имеем выражение при $t \geq 0$:

$$V_0 = \frac{c V_1(t)}{(V_0 t)^\nu}. \quad (14)$$

Решаем совместно уравнения (14) и (13)

$$c V_1(t) = V_0 (V_0 t)^\nu; \quad V_1(z, t) = V_0 \left(\frac{V_0 t}{z} \right)^\nu. \quad (15)$$

В окончательном виде уравнение для определения скорости движения частиц грунта будет иметь вид:

$$V_1 = V_1(z, t) = V_0 \left(\frac{V_0 t}{z} \right)^{\nu} . \quad (16)$$

Полученные зависимости (6), (7) и (16) позволяют определить поле напряжений σ_1 , плотность грунта ρ_1 и скорость перемещения частиц грунта V_1 между двигателем и фронтом волны, возникающей при динамическом воздействии звеньев гусениц движущейся машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баладинский, В.Л. Динамика разрушения сред в строительстве и горном деле [Текст] / В.Л. Баладинский, В.Г. Моисеенко, А.В. Фомин // Оптимальное взаимодействие: симпозиум по террамеханике. – Суздаль, 1992. – С. 251–258.
2. Лобанов, В.Н. Исследование взаимодействия гусеничного движителя с деформируемым грунтом [Текст] / В.Н. Лобанов // Оптимальное взаимодействие: симп. по террамеханике. – Суздаль, 1992. – С. 93–97.
3. Ляхов, Г.М. Волны в грунтах и пористых средах [Текст] / Г.М. Ляхов. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
4. Умов, Н.А. Избранные сочинения [Текст] / Н.А. Умов. – М.: Наука, 1950. – 412 с.

V.N. Lobanov

Dynamics of Interaction of Tracked Forest Machines with Weak Soils

Formulae for determining soil consistency and speed of its particles traverse between engine and wave front taking into account the time of process passing are obtained.
