

Разработка программного обеспечения для моделирования взаимодействия пневматической шины и грунта

Руководитель: Белова И.М.

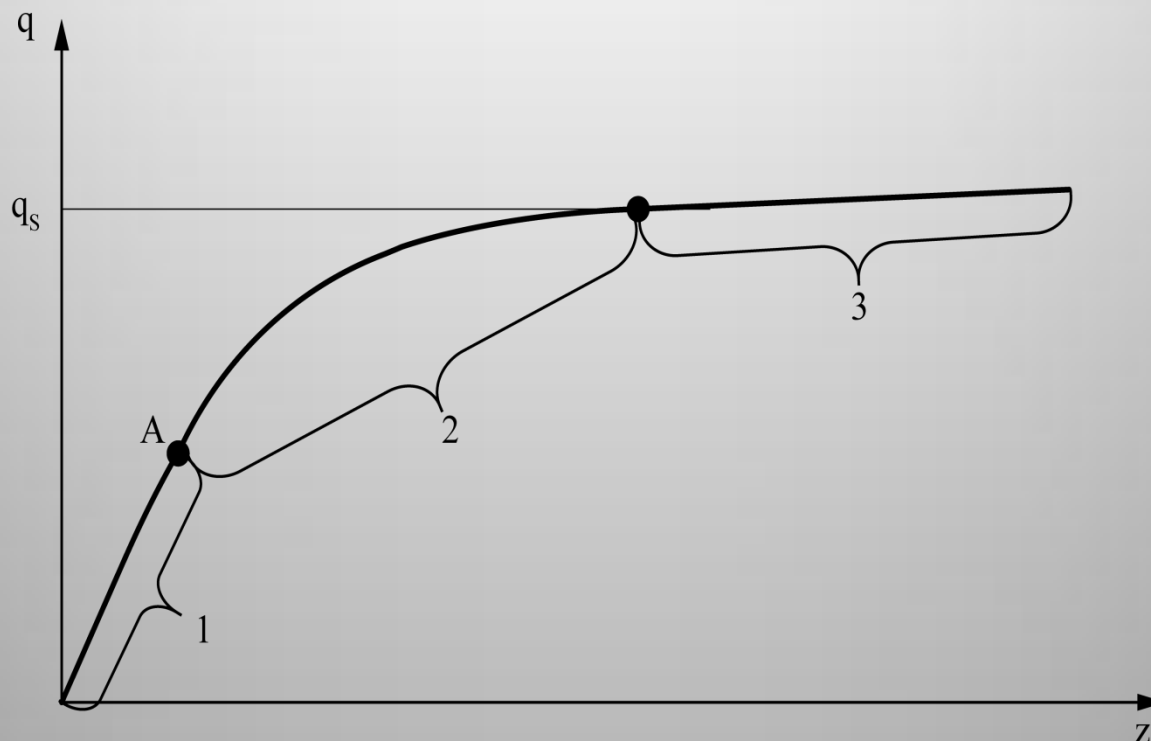
Дипломник: Горбачева О.В.

Цель работы



- Разработка компьютерной программы для расчета параметров шины и грунта при проходе колесного автомобиля по мягким грунтовыми поверхностям.

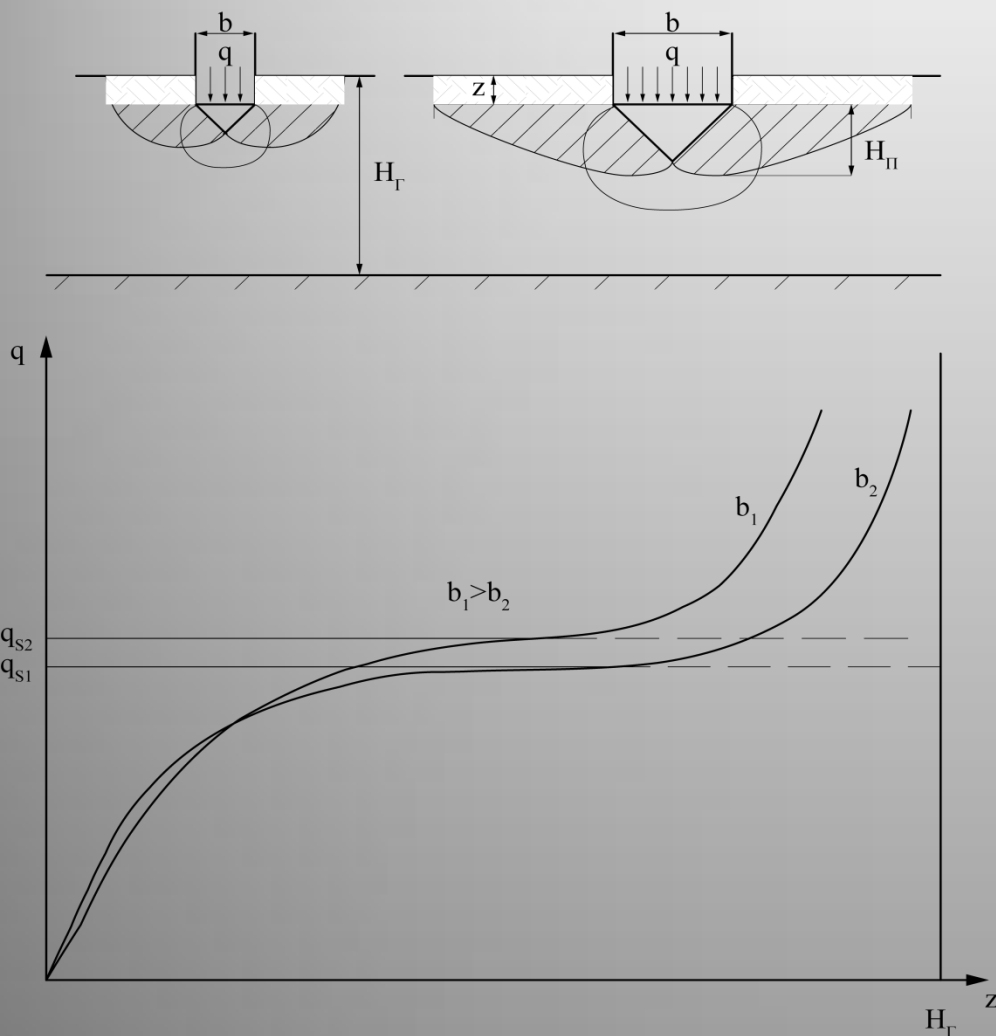
Зависимость деформации грунта от нормальной нагрузки



q_s - несущая способность грунта;

z - глубина колеи;

Влияние ширины штампа на характеристику деформации грунта



b – ширина штампа;
 H_Γ – толщина мягкого слоя;

H_Π – высота призмы
выпирания;

Модель взаимодействия шины с мягким грунтом

$$q = \frac{E \cdot z}{0,5 \cdot a \cdot b \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{H_r - z}{0,5 \cdot a \cdot b} \right) + \frac{2 \cdot I \cdot E \cdot z \cdot Q}{q_s}},$$

$$q_s = I_1 \cdot X_1 \cdot \rho \cdot b + I_2 \cdot X_2 \cdot c_0 + I_2 \cdot X_3 \cdot \rho \cdot z,$$

$$I = \frac{0,03 + \frac{l}{b}}{0,6 + 0,43 \cdot \frac{l}{b}}, \quad I_1 = \frac{1,4 \cdot l}{(l + 0,4 \cdot b)}, \quad I_2 = \frac{0,75 \cdot (l + b)}{(l + 0,5 \cdot b)},$$

$$a = 0,64 \cdot \left(1 + \frac{b}{H_r}\right), \quad Q = \frac{\pi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\pi H_r - z}{2b},$$

$$X_1 = \frac{\rho \cdot 1 - X^4}{X^6}, \quad X_2 = \frac{1,3 \cdot c_0 \cdot X^2 + 1}{X^4}, \quad X_3 = \frac{\rho}{X^6}, \quad X = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_0}{2} \right)$$

Решение задачи сводится к решению системы 9 нелинейных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} P_Z = 0,25 \cdot \pi \cdot q_{uu} ((1 - \xi \cdot 0,5) \cdot 2 \cdot b \cdot \sqrt{D \cdot h - h^2} + \xi \cdot b_k \sqrt{D \cdot (h + z) - (h + z)^2}), \\ q_\partial = \frac{q_{uu}}{1 + \frac{\nu}{2 \cdot \varphi_0 \cdot l}}, \\ b_k = b + h, \\ l = \sqrt{D \cdot h - h^2} + \sqrt{D \cdot (h + z) - (h + z)^2}, \\ I = \frac{0,03 \cdot (b + b_k) + 2 \cdot l}{0,6 \cdot (b + b_k) + 0,86 \cdot l}, \\ I_1 = \frac{l}{l + 0,2 \cdot (b + b_k)}, \\ I_2 = \frac{l + b}{l + 0,5 \cdot b}, \\ q_{uu} = \frac{\pi \cdot h \cdot (p_0 + p_w)}{2 \cdot b} \left(\frac{B}{H} + \frac{3}{2} \frac{H}{B} \right) \left(1 - \frac{h}{B} \right), \\ q_\partial = \frac{E \cdot z}{0,5 \cdot a \cdot (b + b_k) \cdot \arctg\left(\frac{H_\Gamma - z}{0,5 \cdot a \cdot (b + b_k)}\right) + \frac{2 \cdot I \cdot E \cdot z \cdot \arctg\left(\frac{\pi(H_\Gamma - z)}{b + b_k}\right)}{\pi(I_1 X_1 k_{\beta_1} b + I_2 X_2 k_{\beta_2} c_0 + X_3 z)}}. \end{array} \right.$$

Метод Ньютона для решения системы нелинейных уравнений

Пусть дана система нелинейных уравнений

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \end{cases} \quad \text{или} \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0.$$

Корень имеет вид: $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)}$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{f}'(\mathbf{x}^{(k)}) \Delta \mathbf{x}^{(k)} = 0, \quad \mathbf{f}'(\mathbf{x}) = \mathbf{W}(\mathbf{x}) = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{i,j=1,2,\dots,n}.$$
$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{W}(\mathbf{x}^{(k)}) \Delta \mathbf{x}^{(k)} = 0,$$

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}^{(k)}) \Delta \mathbf{x}^{(k)} = -\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (1)$$

Для решения уравнения (1) относительно $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$
можно воспользоваться LU-разложением.

Представляем исходную матрицу $W(x^{(k)})$ в виде:

$$W(x^{(k)}) = L \cdot U$$

Тогда $W(x^{(k)})\Delta x^{(k)} = -f(x^{(k)})$ примет вид:

$$(L \cdot U) \cdot \Delta x^{(k)} = L \cdot \underbrace{(U \cdot \Delta x^{(k)})}_{y^{(k)}} = -f(x^{(k)})$$

Решаем первое уравнение относительно $y^{(k)}$:

$$L \cdot y^{(k)} = -f(x^{(k)})$$

Затем второе относительно $\Delta x^{(k)}$:

$$U \cdot \Delta x^{(k)} = y^{(k)}$$

Тогда следующее приближение:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}.$$


Результаты вычислений

Первый проход:

$H_T, м$	$E, Па$	$c_0, Па$	$\rho_C, кг / м^3$	$\varphi_0, град$
0,6	$6,4 \cdot 10^6$	10150	1000	10,32

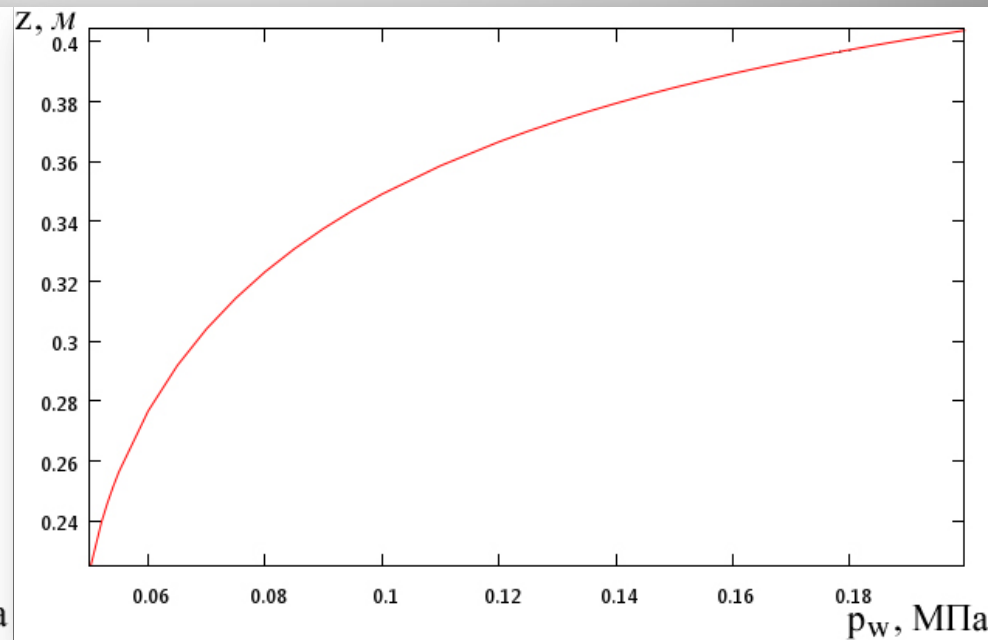
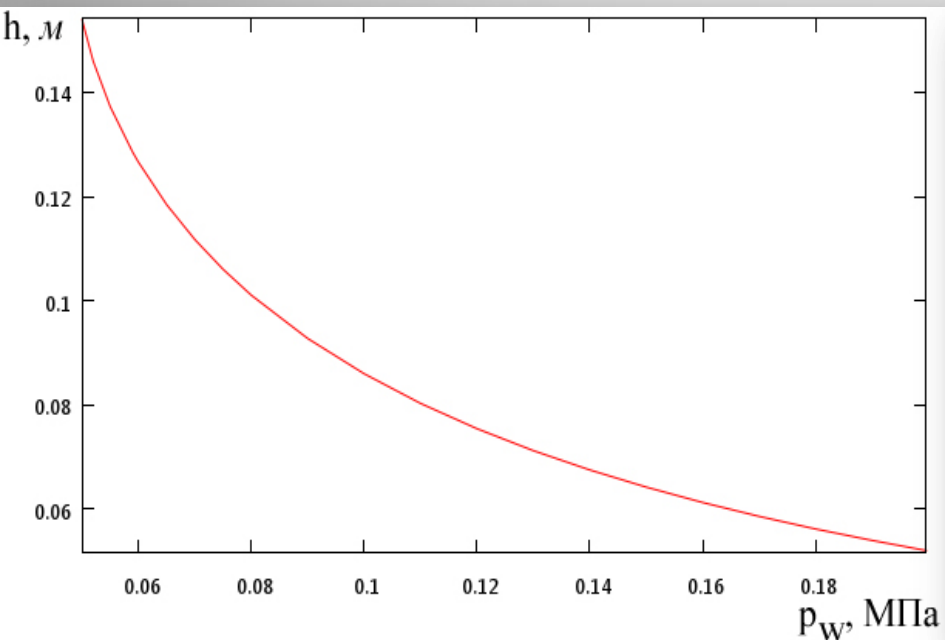
$q_{ш(1)}$	$q_{\partial(1)}$	$b_{k(1)}$	$I_{(1)}$	$I_{1(1)}$	$I_{2(1)}$	$l_{(1)}$	$h_{(1)}$	$z_{(1)}$
88193	69716	0,43	1,54	0,87	1,13	0,91	0,15	0,22

Второй проход:

$H_T, м$	$E, Па$	$c_0, Па$	$\rho_C, кг / м^3$	$\varphi_0, град$
0,35	$7 \cdot 10^6$	$10,8 \cdot 10^3$	1033	10,9 

$q_{ш(2)}$	$q_{\partial(2)}$	$b_{k(2)}$	$I_{(2)}$	$I_{1(2)}$	$I_{2(2)}$	$l_{(2)}$	$h_{(2)}$	$z_{(2)}$
$89 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$	0,46	1,48	0,86	1,14	0,86	0,18	0,027

Зависимость деформации шины и глубины колеи от внутреннего давления в шине



Выводы

- ❑ Разработана программа, которая рассчитывает параметры пневматической шины и грунта при проходе колесного автомобиля по мягкой грунтовой поверхности;
- ❑ Реализованы два метода решения системы 9 нелинейных уравнений: метод простых итераций и метод Ньютона;
- ❑ Программа учитывает количество проходов автомобиля, то есть количество колес, проходящих по одной и той же колее