

**Федосов А.П. Использование данных зондирования для определения глубины колеи и сопротивления движению колесного движителя внедорожных транспортных средств при прямолинейном движении по деформируемому грунту.**

*Предлагается методика приближенного расчета глубины колеи и сопротивления движению пневматического колесного движителя вне дорожных транспортных средств при одиночных и многократных прямолинейных проходах по деформируемому грунту, характеризваемому диаграммой зондирования.*

*Методика использована в прошедшей практической проверке компьютерной модели расчета проходимости транспортных средств.*

В инженерной практике в ряде случаев возникает необходимость оценки внедорожных транспортных средств в части преодоления тяжелых с точки зрения проходимости - заболоченных, увлажненных и переувлажненных, целинных участков местности. Причем в первом приближении оценку производят по возможной глубине колеи. Если расчетная глубина менее дорожного просвета, то вероятность потери проходимости весьма мала, так как транспортные средства, предназначенные для движения вне дорог, как правило, полноприводные и обладают, при прямолинейном движении, высокими тяговыми характеристиками. Если же глубина колеи больше дорожного просвета, то вероятность потери проходимости резко увеличивается за счет появления дополнительного сопротивления-трения днища, мостов, элементов ходовой части о грунт. В этом случае необходимо вычисление тяговых характеристик.

Для расчета глубины колеи необходимо определить грунтовые условия, которые описывают, как правило, так называемыми кривыми "нагрузка-осадка", получаемыми с помощью пенетрометров.

При пенетрации внедрение индентора-конуса в грунт производится на глубину до высоты наконечника. Полученная характеристика может быть распространена на всю глубину действующих от движителя напряжений в случае, если грунт однородный.

Если грунт неоднородный, то необходимо знание характера сложения грунтового основания до глубины распространения напряжений от движителя, с учетом образуемой колеи  $H_a = H_c + H_{\alpha}$

$$H_a = H_c + H_{\alpha} \quad [1]$$

где  $H_c$ -величина дорожного просвета (определяет возможное погружение автомобиля при движении по слабым грунтам, до касания днища);

$H_{\alpha}$ -глубина распространения напряжений от одиночного движителя,  $H_{\alpha} \sim 0.75B$  (B-ширина шины);

Для основных внедорожных транспортных средств величина дорожного просвета,  $H_c$  составляет 0.32-0.58 м (таблица 1), ширина шин (принимается по протектору Впр, таблица 3)-0.25-0.46, соответственно  $H_{\alpha} = 0.18-0.34$  м. Таким образом  $H_a = H_c + H_{\alpha} = 0.50-0.92$  м.

Таблица 1

Тип шасси	Дорожный просвет, м
ЗИЛ-135ЛМ	0.580
МАЗ-543	0.450
Урал-375	0.400
КамАЗ-6320	0.365
Краз-255	0.360
ЗИЛ-131	0.330
ГАЗ-66	0.315

Получение кривых "нагрузка-осадка" с помощью штамповых испытаний, учитывающих неоднородность основания, в полевых условиях требует больших временных затрат и сложного оборудования. В связи с этим в ряде случаев используют передвижные зондирующие установки с инденторами (штампами) небольшого диаметра, требующими значительно меньшего усилия внедрения в грунтовое основание до заданной глубины, и обладающие большей производительностью. Зондировочные диаграммы в данном случае характеризуют деформируемость грунта по глубине.

В данной работе предлагается использовать данные зондирования для получения приближенных характеристик колееобразования и сил сопротивления пневматического колесного

двигателя полноприводного внедорожного транспортного средства, движущегося равномерно и прямолинейно, при многократных проходах по одному следу.

Глубину колеи для одиночного двигателя можно вычислить с помощью известного в механике грунтов метода послойного суммирования [1].

Метод заключается в мысленном выделении в грунте под центром контакта вертикальной призмы. Для различных сечений определяют по теории линейно деформируемых тел максимальное сжимающее напряжение  $\sigma_z$ .

Осадка штампа будет равна:

$$S = \beta \sum H_i \sigma_{zpi} / E_{oi}$$

$H_i$  - мощность отдельных слоев грунта;  $\beta$  - коэффициент зависящий от бокового расширения;

$E_{oi}$  - модуль деформации грунта  $i$ -того слоя.  $\sigma_{zpi}$  - напряжения в  $i$ -том слое,

Закон изменения напряжений по глубине в соответствии с [2]:

$$\sigma_z = P / ch 1.85 h_z / B$$

где  $P$  - среднее давление на грунт;

$h_z$  - расстояние от рассматриваемого слоя до плоскости контакта;

$B$  - ширина штампа;

Разбив всю толщу грунта на  $n$ -ное число слоев, равных  $Dh$ , и учитывая, что на характер погружения контактирующих с грунтом элементов влияют их геометрические размеры - диаметр (или меньшая сторона штампа, колеса) и соотношение длины и ширины [1], запишем формулу в виде:

$$S = \beta k_\phi k_d \Delta h \sum (P / E_{oi}) (1 / ch 1.85 H_z / B) [4]$$

где  $k_\phi$  - коэффициент формы, который можно вычислить по формуле

$$k_\phi = 0.957 (L/B) 0.385;$$

$k_d$  - коэффициент размера, который может быть вычислен по формуле,  $k_d = (d/D) 0.5$ ,

полученной в результате испытаний, со штампами диаметрами 0.05, 0.01, 0.15, 0.34,

0.50, 0.70 м на деформируемых, слоистых грунтах различного состояния;  $D$  - диаметр или меньшая сторона штампа большего размера,  $d$  - диаметр или меньшая сторона штампа меньшего размера.

Выделение слоев грунта и получение модуля деформации каждого слоя в полевых условиях связано со значительными трудностями, в связи с этим часто проводят ускоренные испытания грунтов установками типа С-832 [3] круглыми, плоскими, жесткими штампами диаметром 0.030-0.150, сводя до минимума боковое трение штампа. В результате испытаний получают зондировочные диаграммы различных грунтов, характеризующие количественные характеристики деформируемости (аналогично модулю деформации) грунтовой толщи  $P_{si}$  в функции глубины внедрения  $h_z$  (см. рис 1, пояснения к рис. даны в таблице 2).

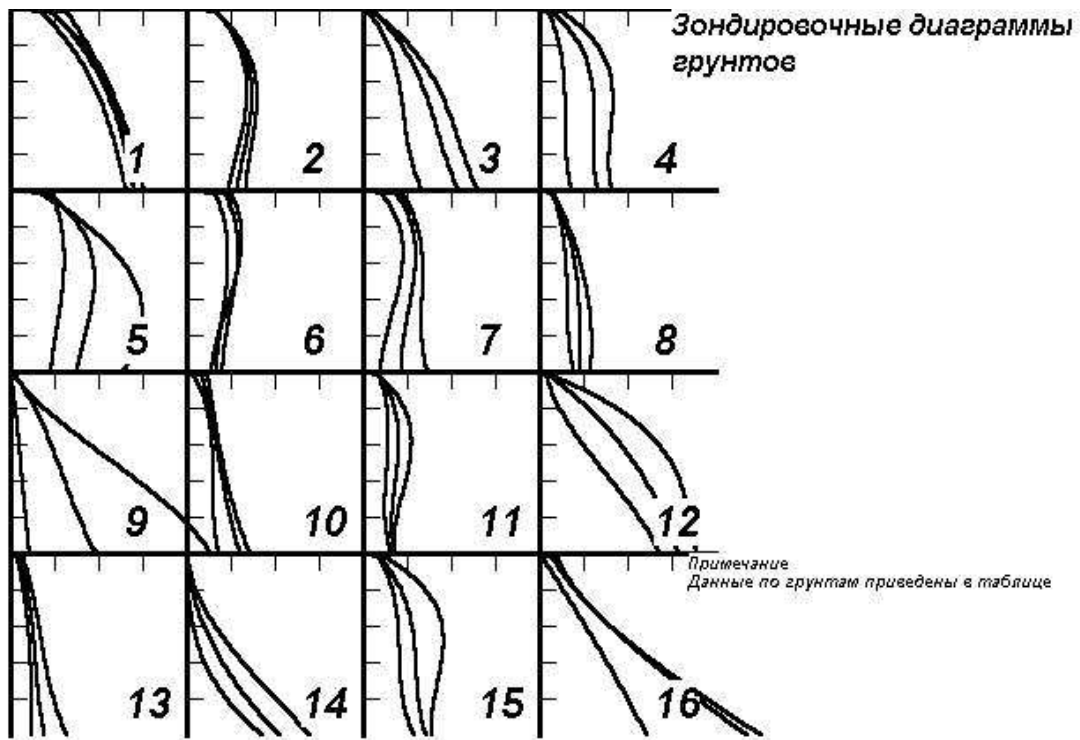


Рис 1

Для расчета также необходимо определить геометрические размеры поверхности контакта колеса с грунтом - длину и ширину.

Длина плоской поверхности контакта,  $L$ , рассчитывается по эмпирической, удовлетворительно согласующейся с экспериментальными данными формуле:

$$L = 2R \sin(\arccos(1 - z/R))^{0.7} (0.035/P_w + 0.5) \quad [5]$$

где  $z$  - радиальная деформация шины, м, определяемая по формуле Бидермана:

$$C_2 Z = C_2 G_k / 2(P_w + P_0) + \sqrt{C_2 G_k / 2(P_w + P_0) + C_1 G_k}$$

$C_1$  - коэффициенты жесткости шины  $\text{м}^2/\text{кН}$ ;

$C_2$  - коэффициенты жесткости шины  $1/\text{м}$ ;

$P_0$  - жесткость каркаса покрышки,  $\text{кПа}$ .

$G_k$  - нагрузка на колесо,  $\text{кН}$ ;

$P_w$  - внутреннее давление воздуха в шине,  $\text{кПа}$ ;

Приведенная формула позволяет определить геометрические размеры поверхности контакта на твердой опорной поверхности в зависимости от давления воздуха в шине  $P_w$  и нагрузки на колесо  $G_k$ .

Таблица 2

N гр.	Время проведения испытаний	Тип грунта	Характеристики грунта участка испытаний		
			Удельное сцепление $C_0$ , кПа	Угол внутреннего трения $F_0$ , гр.	Влажность $W$ , %
1	осень	Супесь	3-5(5) 10	19-23(21) 21	12-18(16)
2	осень	Суглинок	10-13(12)	17-28(23)	19-23(20)
3	весна	Супесь	10-23(14)	20-23(21)	16-30(21)
4	весна	Суглинок	20-46(35)	25-30(27)	18-28(24)
5	осень	Суглинок			15-21(18)
6	осень	Суглинок			
7	весна	Суглинок			11-30(22)
8	осень	Суглинок			
9	весна	Суглинок			
10	весна	Суглинок			27-28
11	весна	Суглинок			18-22(23)
12	осень	Суглинок			
13	весна	Лессовый суглинок			
14		Тяжелый суглинок	36-58	16-29	10-16
15	весна	Суглинок			16-19
16	весна				

2.0

Примечания:

1).Сплошные линии характеризуют средние значения по площадке испытаний, пунктирные линии-крайние значения (грунты N1-15).

2).Грунт N14-характеристики получены в грунтовом канале.

3).Грунт N16:

а- легкая супесь, солончаковатая,  $W=9-14$ ,

б- тяжелый суглинок,  $W=8-15$ ,

с- тяжелосуглинистый такыр,  $W=23-29$ .

4).В скобках даны средние значения величин по участку.

5).Ось X-сопротивление зондированию  $P_s$ . 1 деление-500 кПа. Ось Y-глубина зондирования  $H$ . 1 деление - 0.1 М.

6).Характеристики получены круглыми жесткими штампами, диаметром 0.15 м.

Коэффициенты  $C_1$ ,  $C_2$  и жесткость каркаса покрывки  $P_0$  рассчитываются по результатам испытаний, в которых шина подвергается обжатию статической нагрузкой.

Ширина пятна контакта для простоты расчетов принимается равной ширине протектора  $B=B_{пр}$ .

В таблице 3 приведены данные по шинам, использовавшимся в испытаниях.

На грунтовой опорной поверхности величина радиальной деформации отлична от деформации шины на твердой опорной поверхности: В работе[4] приведены данные, позволяющие определить степень уменьшения радиальной деформации в зависимости от деформативности грунта.

В окончательном виде зависимость представлена в виде:

$$h = \beta k_{\phi} k_d \Delta h \sum (P/P_{si})^n (1/ch 1.85 H_z/B)[7]$$

где  $n$ -коэффициент, учитывающий степень влияния отношения среднего удельного давления к модулю деформации, выраженному удельным сопротивлением зондированию, на осадку штампа, ( $n=1.9$ ).

$h$  -глубина колеи;

Приведенная зависимость позволяет рассчитывать глубину колеи одиночного движителя на основании зондировочных диаграмм.

Расчет глубины колеи при многократных проходах связан с необходимостью прогнозирования изменения характеристик грунта под нагрузками, вызываемыми колесными движителя.

Обозначение шины	Диаметр шины, D	Ширина профиля шины, B <sub>ш</sub>	Ширина протектора шины, B <sub>пр</sub>	Характеристики жесткости шины		
				P <sub>o</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
	м	м	М	кПа	м2/кН	1/м
1500x600x635	1.500	0.600	0.460	30.0	2.30E-5	0.230
1600x600x685	1.600	0.600	0.460	30.0	2.50E-5	0.230
OI-25	1.270	0.380	0.300	7.1	5.83E-5	0.371
OI-314	1.260	0.410	0.310	40.8	4.47E-5	0.296
OI-58	1.280	0.384	0.325	33.3	4.80E-5	0.364
M-93	1.146	0.335	0.250	28.0	4.54E-5	0.368
KI-113	1.089	0.345	0.245	24.5	4.37E-5	0.527
IK-286	1.144	0.384	0.250	3.1	5.45E-5	57.300

Как показали испытания нарастание деформаций в зависимости от числа проходов по логарифмическому закону справедливо для довольно прочных грунтов: для супесчаных и суглинистых грунтов, маловлажных и увлажненных до предела пластичности ( $P_s > 800$  кПа) В этих случаях можно воспользоваться приведенной эмпирической зависимостью [8].

Естественный грунт при этих испытаниях подвергался многократным штамповым нагружениям (методика предложена Поляковым И.С.),

При этом фиксировались величина нагрузки, соответствующее погружение штампа в грунт и величина отпора грунта:

$$H_{\text{полн}} = H_1 + (H_1/\lambda) \lg x,$$

2.0

где  $H_{\text{полн}}$  - глубина погружения деформатора после  $x$ -го нагружения  $10^{-2}$  м;  $H_1$ - глубина погружения деформатора после 1-го нагружения,  $10^{-2}$  м;  $x$ - число нагружений;  $\lambda$  - коэффициент нарастания деформации ( $\lambda = 1.5-2.5$ ).

При больших значениях влажности эта закономерность перестает соблюдаться.

Сопоставление зондировочных диаграмм грунта, полученных в этих испытаниях, с глубиной колеи после прохода многоосной машины позволило получить следующую эмпирическую формулу:

- где:  $Q_{ш}$  - удельное давление шины на грунт, кПа;  
 $P_s$  - удельное сопротивление внедрению штампа в грунт, (берется из зондировочной диаграммы на глубине, соответствующей погружению движителя), кПа;  
 $P_w$  - внутреннее давление воздуха в шине, кПа;  
 $G_k$  - нагрузка на колесо, кН;  
 $G_p$  - нагрузка на эталонное колесо (73.55, кН);  
 $N$  - эмпирический коэффициент ( $N=0.0165$ );  
 $K$  - эмпирический коэффициент ( $K=0.0035$ );  
 $H_n$  - глубина колеи при n-ом проходе колеса, м;  
 $h$  - глубина колеи при 1-ом проходе колеса, м;

В таблице 4 приведены экспериментальные значения глубины колеи шасси типа МАЗ-543 и рассчитанные с помощью представленных формул [7,9]. Расчет производился с использованием метода наименьших квадратов[5], среднее квадратичное отклонение составило 4 мм.

Номер грунта (в соотв. с рис 1)	Глубина колеи после 4-х кратного прохода колеса по одному следу, м	
	Вычисленная	Полученная из эксперимента
1	0.018	0.020
2	0.029	0.010
2	0.042	0.035
7	0.032	0.040
7	0.057	0.058
8	0.055	0.058
9	0.018	0.025
9	0.259	0.190
9	0.229	0.165

Представленные зависимости по определению глубины колеи при одиночных и многократных проходах полноприводного колесного шасси могут быть использованы при оценочных расчетах внедорожных транспортных средств, аналогичных шасси МАЗ-543, по условию проходимости - исчерпание дорожного просвета, когда известны характеристики зондирования грунта. В первом приближении можно пользоваться данными, приведенными на рис 1.

Вычисления, проведенные с помощью компьютерной программы с использованием предлагаемых зависимостей, показывают удовлетворительную сходимость расчетных величин и экспериментальных данных.