

Анализ зависимостей деформируемости опорной поверхности. Горизонтальные деформации

В.В. Ларин¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

Представлен анализ достоинств и недостатков зависимостей, описывающих изменение горизонтальной деформации опорной поверхности под деформаторами и используемых при оценке опорной проходимости безрельсовых транспортных средств (колесных, гусеничных и других).

E-mail: larin.lv20946@yandex.ru

Ключевые слова: транспортное средство, опорная поверхность, грунт, деформация, вертикальная деформация, деформатор-штамп.

Помимо вертикальных деформаций при оценке опорной проходимости транспортных средств (ТС), движущихся по деформируемым опорным поверхностям (ОП), необходимо знать изменения горизонтальных деформаций поверхностей под их движителями, определяющих тяговые возможности ТС.

При одновременном приложении вертикальной P_z и горизонтальных P_x, P_y сил появляются дополнительная вертикальная $\Delta h_{г,z}$ и горизонтальная $h_{г,x}$ деформации грунта (далее для простоты изложения размер деформатора по оси X принимаем меньшим, чем по оси Y), которые зависят от отношения нормального давления p_z к несущей способности грунта $p_z^{H_{г}}$ [1]. При средних и больших значениях $p_z/p_z^{H_{г}}$ (рис. 1, а) происходит снижение несущей способности $p_z^{H_{г}}$ и появляется возможность возникновения дополнительной вертикальной деформации $\Delta h_{г,z}$. При малых значениях $p_z/p_z^{H_{г}}$ (рис. 1, б) грунт испытывает в основном деформации сжатия, тогда как сдвиги в его массиве и дополнительная вертикальная деформация $\Delta h_{г,z}$ ничтожно малы. Горизонтальные силы могут быть ограничены двумя факторами: потерей несущей способности со сдвигом массы грунта в сторону действия горизонтальной силы и скольжением деформатора по ОП после преодоления сил сцепления между ними. В обоих случаях горизонтальная деформация $h_{г,x}$, или сдвиг j_x деформатора, различны.

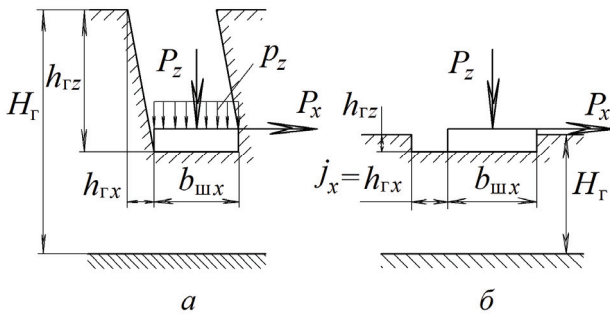


Рис. 1. Схемы деформаций грунтовой массы ОП при действии вертикальной и горизонтальной нагрузки на деформатор

Рассмотрим вначале случай средних и больших отношений $p_z/p_{z\text{сд}}^{H_\Gamma}$, приводящий часто к потере подвижности движителя и ТС. При постоянном давлении $p_{zi} = \text{const}$ и отсутствии продольной силы ($P_x = 0, v_x = 0$) вертикальная деформация ОП определяется величиной $h_{\Gamma z 0}$ (рис. 2), а при $\tilde{P}_x > 0, v_x > 0$ — величиной $h_{\Gamma z v} > h_{\Gamma z 0}$, обусловленной снижением несущей способности ОП [1]. Кривая $h_{\Gamma z 0}$ переходит в кривую $h_{\Gamma z v}$, давление $p_{z\text{сд}0}^0 \rightarrow p_{z\text{сд}v}^0$. По мере увеличения отношения $p_z/p_{z\text{сд}}^{H_\Gamma}$ дополнительное вертикальное погружение деформатора под действием силы P_x возрастает и при $p_z \approx p_{z\text{сд}}^{H_\Gamma}$ резко увеличивается деформация $\Delta h_{\Gamma z} = h_{\Gamma z v} - h_{\Gamma z 0}$ [1].

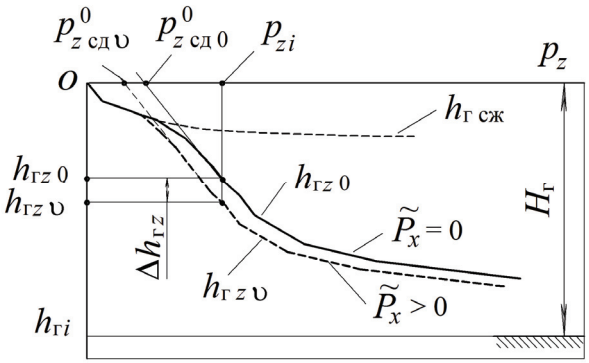


Рис. 2. Схема определения вертикальной деформации ОП при давлениях, близких к несущей способности, и наличии горизонтальной силы

Поскольку деформатор имеет размер и по высоте, то при его заглублении часть горизонтальной силы воспринимается его лобовой

поверхностью и на массив грунта под ним действует меньшая сила, которую необходимо учитывать при расчете $h_{г\ сд}$ [1].

Максимальное касательное напряжение $\tau_{x\ н.с}^{\max}$, воспринимаемое грунтом и ограниченное его несущей способностью $p_{z\ сд}^{H_{г}}$:

$$\tau_{x\ н.с}^{\max} = p_{z\ сд}^{H_{г}} \operatorname{tg} \nu_x, \quad (1)$$

а горизонтальное перемещение деформатора, или деформация грунта,

$$j_x = \Delta h_{г\ x} = \frac{\Delta h_{г\ z} \tau_x}{p_z}. \quad (2)$$

Возникновение $\Delta h_{г\ z}$ и j_x при потере несущей способности возможно только в случае, если несущая способность $p_{z\ сд}^{H_{г}}$ в плоскости действия наклонной нагрузки становится меньше несущей способности в обеих плоскостях при меньшей горизонтальной силе, действующей в плоскости деформатора. Так, при $p_{z\ сд\ 0\ x} > p_{z\ сд\ 0\ y}$ вертикальная деформация $h_{г\ z}$ определяется по $p_{z\ сд\ 0\ y}$, и при увеличении относительной силы \tilde{P}_x или угла ν_x дополнительная деформация $\Delta h_{г\ z}$ появится только при $p_{z\ сд\ \nu_x} < p_{z\ сд\ 0\ y}$ (рис. 3).

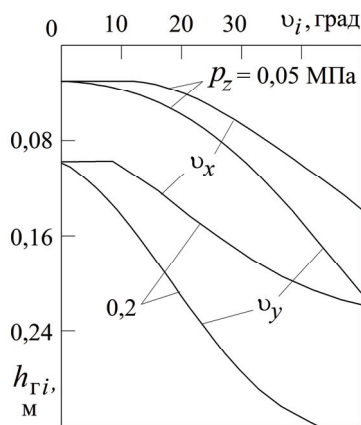


Рис. 3. Изменение вертикальной деформации на песке рыхлом пылеватом $H_{г} = 0,4$ м под плоским прямоугольным деформатором $0,2 \times 0,4$ м ($b_{ш\ y} \times b_{ш\ x}$) при приложении суммарной силы под углом ν_i в поперечно-вертикальной (ν_y) и продольно-вертикальной (ν_x) плоскостях [1]

Рассмотренные процессы справедливы, как отмечено выше, в зоне потери несущей способности ОП и предположении об отсутствии перемещений “подошвы” деформатора относительно прилегающего к нему грунта, т. е. сдвиги происходят в толще грунта ниже зоны его контакта с деформатором.

При малых отношениях $p_z/p_z^{H_r}_{сд}$ необходимо учитывать профиль нижней поверхности деформатора (подошвы), который может быть гладким или иметь грунтозацепы.

При гладкой подошве и высоком сцеплении частиц грунта (плотный грунт) его горизонтальная реакция R_x определяется коэффициентами трения покоя $\mu_{пок}$ и скольжения $\mu_{ск}$ материала деформатора о грунт. Если продольная сила $P_x = R_x \leq \mu_{пок} P_z$, то горизонтальное перемещение деформатора и деформация грунта отсутствуют: $j_x = h_{г,x} = 0$. При $P_x > \mu_{пок} P_z$ деформатор начинает скользить по грунту $j_x > 0$ и реакция $R_x = \mu_{ск} P_z$ (см. рис. 1, б).

При гладкой подошве, низком сцеплении частиц грунта (рыхлый грунт), но высоком сцеплении подошвы с его частицами величины R_x и j_x определяются процессом взаимного перемещения частиц грунта под деформатором. Их рассчитывают как для деформатора с грунтозацепами при расстоянии между ними $t_{гpz} = b_{ш,x}$ и высоте $h_{гpz} = 0$.

При наличии грунтозацепов продольная реакция R_x складывается из элементарных реакций трения по выступам, а также сдвига и отпора грунта, расположенного между грунтозацепами.

Максимальное касательное напряжение $\tau_{x\Gamma}^{\max}$, ограниченное взаимным скольжением частиц грунта, все исследователи вычисляют с использованием предложенного Ш. Кулоном общепринятого выражения

$$\tau_{x\Gamma}^{\max} = p_z \operatorname{tg} \varphi_r + c_r, \quad (3)$$

в котором угол внутреннего трения φ_r и связанность грунта c_r являются параметрами прямолинейной диаграммы сдвига, соответствующими рассматриваемому его состоянию.

При сцеплении поверхности деформатора с грунтом, меньшем взаимного сцепления частиц грунта, в уравнение (3) вместо φ_r и c_r подставляют параметры $\varphi_{ш-\Gamma}$ и $c_{ш-\Gamma}$ внешнего трения деформатора по грунту и определяют $\tau_{x\text{ш}-\Gamma}^{\max}$. Реальное значение τ_x^{\max} при расчете R_x равно меньшему из $\tau_{x\text{н.с.}}^{\max}$, $\tau_{x\Gamma}^{\max}$ и $\tau_{x\text{ш}-\Gamma}^{\max}$ [1].

Для нахождения напряжений τ_x по сдвигу j_x (в дальнейшем так будем обозначать горизонтальную деформацию $j_x = h_{г,x}$) предложено несколько формул. Однако до настоящего времени нет общепри-

нятой интерпретации закона $\tau_x(j_x)$. Наибольшее распространение получила формула экспоненты, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными для несвязанных, слабых, водонасыщенных и рыхлых грунтов:

$$\tau_x = \tau_x^{\max} (1 - e^{-|j_x|/j_0}) = \tau_x^{\max} [1 - \exp(-|j_x|/j_0)], \quad (4)$$

где j_0 — модуль горизонтальной деформации по диаграмме сдвига.

Для грунтов, обладающих значительной связанностью, предложено несколько зависимостей. Например, Я.С. Агейкин [2] предлагает пользоваться для всех грунтов уравнениями двух видов:

$$\tau_x = \frac{1}{\frac{1}{\tau_x^{\max}} + \frac{t_{\text{вп}}}{E_{\tau} |j_x|}}; \quad \tau_x = \tau_x^{\max} \left[1 - \exp\left(\frac{-E_{\tau} |j_x|}{t_{\text{вп}}}\right) \right]; \quad (5)$$

$$\tau_x^{\max} = p_z \operatorname{tg} \varphi_r + c_r (1 - |j_x|/t_{\text{вп}}),$$

где $t_{\text{вп}}$ — расстояние между выступами (грунтозацепами) деформатора; E_{τ} — модуль деформации сдвига, $E_{\tau} = 22,5c_r + 0,25$; $t_{\text{вп}} - |j_x| \geq 0$.

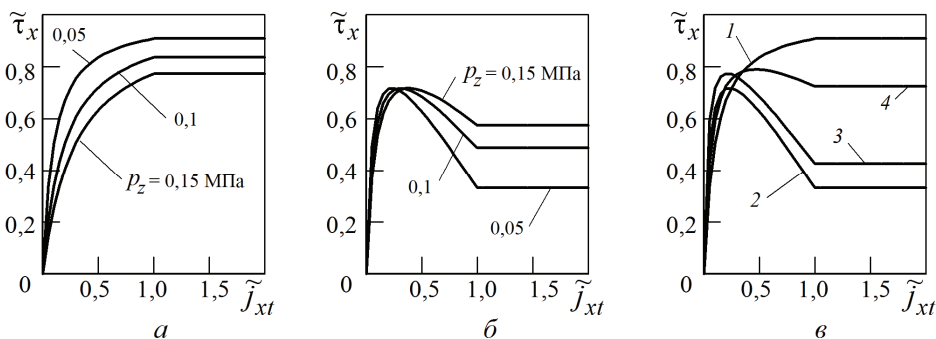


Рис. 4. Зависимости $\tilde{\tau}_x(\tilde{j}_{xt})$, рассчитанные по первой формуле (5) для песка пылеватого рыхлого (а) и суглинка $W = 0,6W_L$ (б), а также для различных ОП при $p_z = 0,05$ МПа (в):

1—4 — соответственно песок пылеватый рыхлый, суглинок, рыхлая пахота весной и снег свежий рыхлый

На рис. 4 представлено изменение $\tilde{\tau}_x = \tau_x/\tau_x^{\max}$ от $\tilde{j}_{xt} = j_x/t_{\text{вп}}$, рассчитанное по первой формуле (5) для четырех видов деформируемых ОП (табл. 1). Зависимости стабилизируются при $\tilde{j}_{xt} \geq 1$, но не достигают максимального значения $\tilde{\tau}_x = 1$, при котором из экспери-

ментов определяют φ_r и c_r (см. выражение (3)), что является недостатком формулы (5). С возрастанием p_z установившиеся напряжения $\tilde{\tau}_x^{уст}$ на песке уменьшаются (см. рис. 4, а), а на суглинке возрастают без существенного изменения $\tilde{\tau}_x^{max}$ при незначительном увеличении соответствующего ему \tilde{j}_{xt} (см. рис. 4, б). Расчеты по второй формуле (5) дают еще худшие результаты (рис. 5).

Таблица 1

Характеристики деформируемых ОП

Тип деформируемых ОП	$\rho_r, \text{т/м}^3$	$\rho_{г.ч}, \text{т/м}^3$	e_{min}	$c_r, \text{МПа}$	$\varphi_r^*, \text{град}$	$\text{tg}\varphi_{ш-г}$
Песок пылеватый рыхлый	1,45	2,65	0,33	0,0001	26	0,30
Суглинок $W = 0,6W_L$	1,40	2,70	0,37	0,0300	17	0,25
Рыхлая пахота весной	1,00	2,70	0,40	0,0080	7	0,01
Снег свежий рыхлый	0,20	0,58	0,40	0,0060	21	0,18

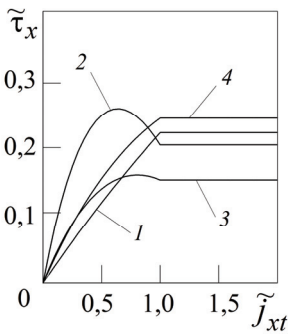


Рис. 5. Зависимости $\tilde{\tau}_x(\tilde{j}_{xt})$, рассчитанные по второй формуле (5) при $p_z = 0,05 \text{ МПа}$:

1–4 — соответственно песок пылеватый рыхлый, суглинок, рыхлая пахота весной и снег свежий рыхлый

Для тракторов и сельскохозяйственных машин используют формулу, предложенную В.В. Кацыгиным [3]:

$$\tau_x = \mu_{ск} p_z \left[1 + \frac{\tilde{\mu}}{\text{ch}(j_x/k_\tau)} \right] \text{th} \frac{j_x}{k_\tau}, \tag{6}$$

где $\tilde{\mu}$, k_τ — соответственно коэффициент приведенного трения и деформации, $\tilde{\mu} = 2,55 \left(\frac{\mu_{п} - \mu_{ск}}{\mu_{ск}} \right)^{0,825}$, $k_\tau = k_x t_{вп}$; $\mu_{п}$ — коэффициент трения покоя; $k_x \approx 0,4$.

На рис. 6, а представлено изменение $\tilde{\tau}_x = f(\tilde{j}_{xt})$, рассчитанное по формуле (6) при $\mu_{\text{п}} = 0,8$ и $\mu_{\text{ск}} = 0,6$. Видно, что $\tilde{\tau}_x^{\text{max}}$ незначительно меньше 1, а установившееся $\tilde{\tau}_x^{\text{yct}} = \mu_{\text{ск}}/\mu_{\text{п}} = 0,75$ стабилизируется лишь при $\tilde{j}_{xt} = 1$ и $k_x = 0,2$. При $k_x > 0,2$ стабилизация проявляется только в случае $j_x > t_{\text{вп}}$, что не соответствует действительности.

Нижегородской школой предложено для расчета деформируемых ОП в виде снега использовать формулу В.А. Малыгина [4]:

$$\tau_x = \tau_x^{\text{max}} \exp\left[-k_1 a (j_x - j_{xm})\right] \frac{1 - \exp\left[\frac{-k_1 j_x (1 - a_x^2)}{a_x}\right]}{1 - \exp\left[\frac{-k_1 j_{xm} (1 - a_x^2)}{a_x}\right]}, \quad (7)$$

где k_1 , a_x — коэффициенты; j_{xm} — перемещение, соответствующее τ_x^{max} .

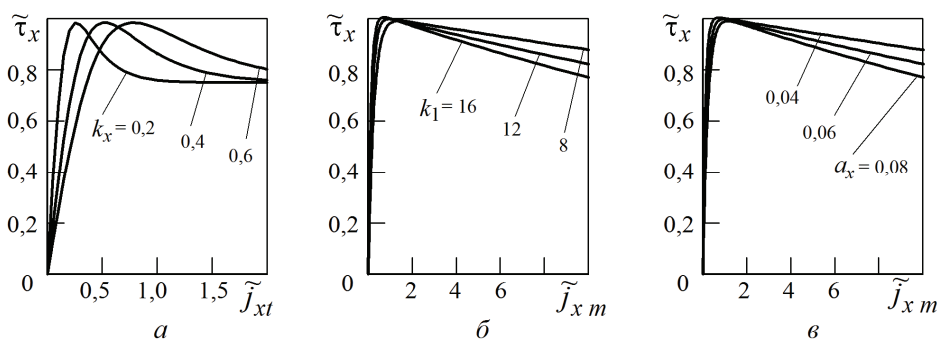


Рис. 6. Зависимости $\tilde{\tau}_x(\tilde{j}_{xt})$ и $\tilde{\tau}_x(\tilde{j}_{xm})$, рассчитанные по формулам (6) (а) и (7) (б, в)

К сожалению, в литературе не представлены значения коэффициентов k_1 и a_x , отмечается лишь, что в большинстве случаев $j_{xm} = 0,01...0,03$ м. На рис. 6, б и в представлены зависимости $\tilde{\tau}_x(\tilde{j}_{xm})$, где $\tilde{j}_{xm} = j_x/j_{xm}$ при $j_{xm} = 0,03$, $a_x = 0,06$ (б) и $k_1 = 12$ (в). Видно, что напряжения, достигнув максимума, с ростом сдвига уменьшаются, но не стабилизируются, что не подтверждается экспериментально.

Для движителей ТС, работающих при высоких нормальных давлениях p_z , когда c_{Γ} незначительно сказывается на τ_x , многие исследова-

дователи считают вполне оправданным расчет по формуле (4) для всех связанных и несвязанных деформируемых ОП. Ее применение оправдано при использовании большинства механических трансмиссий, при которых достаточно проблематично “удерживаться” на пике τ_x^{\max} при относительно узком диапазоне оптимальных значений \tilde{j}_{xt} .

При сверхнизких давлениях, когда p_z и c_r близки, а зона “оптимальных” \tilde{j}_{xt} достаточно велика, неучет пика на кривой $\tau_x(j_x)$ может приводить к значительным ошибкам.

Основная трудность при использовании известных зависимостей $\tau_x(j_x)$ заключается в выборе значений параметров, например модулей деформации сдвига j_0 и E_{τ} , которые определяют экспериментально и соответствуют конкретным деформируемым ОП, параметрам деформатора, диапазонам нормальных давлений.

Большинство исследователей применяют деформаторы по форме и размерам близкие к параметрам контакта движителя с деформируемой ОП, поэтому в литературе значения j_0 , выраженные в метрах, соответствуют деформаторам с длиной $b_{шx} = 0,5...0,8$ м. Значения j_0 и E_{τ} получены для многих деформируемых ОП, однако не в состоянии охватить все поверхности, что усложняет использование представленных зависимостей $\tau_x(j_x)$.

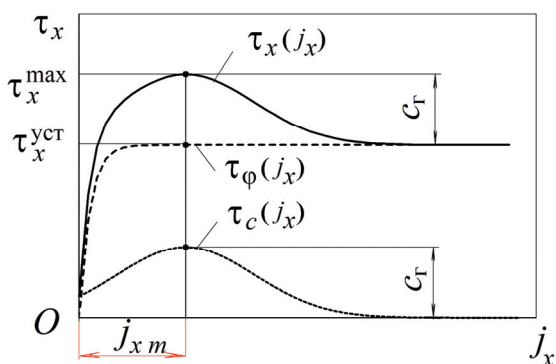


Рис. 7. Схема для расчета параметров сдвига деформатора по ОП

В работе [1] зависимость $\tau_x(j_x)$ представлена в виде суммы $\tau_{x\phi}(j_x)$ и $\tau_{xc}(j_x)$ (рис. 7):

$$\tau_x(j_x) = \tau_x^{уст} \left[1 - \exp\left(\frac{-|j_x|}{j_0}\right) \right] + a_c \exp\left(\frac{-(|j_x| - j_{xm})^2}{a_t}\right), \quad (8)$$

где $\tau_x^{уст} = p_z \operatorname{tg} \varphi_r$; $j_0 = k_{j_0} j_{xm}$; $k_{j_0} \approx 0,1$; $a_c = c_r$; $j_{xm} = K_{сж\ r} b_{шx}$; $a_t = k_{a_t} j_{xm} / \operatorname{tg} \varphi_r$; $k_{a_t} = 0,01$; $K_{сж\ r}$ — коэффициент сжатия грунта в продольном направлении,

$$K_{сж\ r} = \frac{e - e_{\min}}{1 + e}, \quad (9)$$

e , e_{\min} — коэффициенты пористости грунта реальный и минимальный соответственно.

Как и при определении вертикальной деформации сжатия $h_{r\ сж}$, выражение (9) получено из допущений, что j_{xm} обусловлено в основном процессом сжатия грунта в продольном направлении и при достижении критической (максимальной) плотности e_{\min} в грунте наблюдаются только сдвиги ($\tau_x(j_x)$ стабилизируется, стремясь к τ_x^{\max}), а также, что основной объем, в котором происходит сжатие грунта, по длине не превосходит расстояния $t_{вп}$ между выступами грунтозацепов (или при их отсутствии длины деформатора $b_{шx}$), а напряжения сжатия по всей длине одинаковы.

На рис. 8 представлены рассчитанные по формуле (8) зависимости $\tilde{\tau}_x(\tilde{j}_{xt})$ для деформируемых ОП (см. табл. 1), качественно совпадающие с экспериментальными.

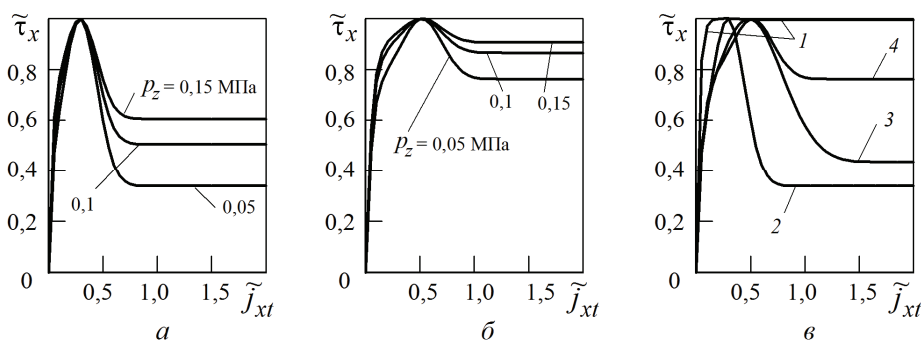


Рис. 8. Зависимости $\tilde{\tau}_x(\tilde{j}_{xt})$, рассчитанные по формуле (8) для суглинка $W = 0,6W_L$ (а), снега свежего рыхлого (б) и различных деформируемых ОП при $p_z = 0,05$ МПа (в):

1—4 — соответственно песок пылеватый рыхлый, суглинок, рыхлая пахота весной и снег свежий рыхлый

При наличии грунтозацепов (выступов), характеризующихся числом $n_{грз}$, шагом $t_{грз}$, длинами выступа $t_{вт}$ и впадины $t_{вп}$, а также высотой $h_{грз}$, при определении $\tau_x(j_x)$ и $R_x(j_x)$ необходимо учитывать отпор грунта по лобовым поверхностям грунтозацепов. Процесс восприятия деформатором продольной силы P_x можно разделить на три фазы (рис. 9).

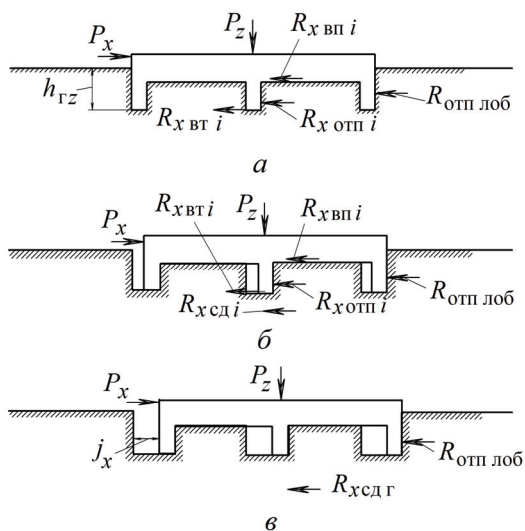


Рис. 9. Схема для расчета параметров сдвига деформатора с грунтозацепами по деформируемому ОП

На первой фазе (см. рис. 9, а) сила $P_x = R_x$ возрастает, но не превышает максимального значения R_{x1}^{max} , а продольный сдвиг j_x мал или близок к нулю. Реакция грунта R_{x1}^{max} обусловлена силами отпора грунта лобовой поверхностью деформатора $R_{отп лоб}$ и лобовыми поверхностями грунтозацепов $R_{x отп i}$, а также реакциями от трения по коям поверхностей впадин $R_{x вп i}$ и выступов $R_{x вт i}$ и от трения боковин деформатора о грунт (последней в связи с ее малостью пренебрегаем). Таким образом, при допущении об одинаковых реакциях на грунтозацепах

$$R_{x1}^{max} = R_{отп лоб} + (n_{грз} - 1)(R_{x отп i} + R_{x вп i}) + n_{грз} R_{x вт i}.$$

При $P_x \leq R_{x1}^{max}$, $P_x = R_x$, как правило, высота грунтозацепов не велика и для сильно деформируемого грунта, вводят допущение о ра-

венстве нормальных давлений: $p_z \text{ вп} = p_z \text{ вт} = p_z$. Реакции определяют по формулам

$$R_{\text{отп лоб}} = b_{\text{ш}y} 0,5 h_{\Gamma z} (q_{\text{пас}} \gamma_{\Gamma} h_{\Gamma z}) \cdot 10^6;$$

$$R_{\text{отп} i} = b_{\text{ш}y} 0,5 h_{\Gamma \text{грз}} q_{\text{пас}} (\gamma_{\Gamma} h_{\Gamma \text{грз}} + p_z) \cdot 10^6;$$

$$R_{x \text{ вп} i} = b_{\text{ш}y} t_{\text{вп}} \tau_{x \text{ вп}} \cdot 10^6; R_{x \text{ вт} i} = b_{\text{ш}y} t_{\text{вт}} \tau_{x \text{ вт}} \cdot 10^6,$$

где $q_{\text{пас}}$ — коэффициент пассивного давления грунта; γ_{Γ} — удельный вес грунта. Напряжения здесь $\tau_{x \text{ вт}}$, $\tau_{x \text{ вп}}$ вычисляют по формуле (8), в которую вместо $b_{\text{ш}x}$ подставляют $t_{\text{вт}}$ и $t_{\text{вп}}$ соответственно, а $\varphi_{\Gamma} = \varphi_{\text{ш-}\Gamma}$, $a_c = c_{\text{ш-}\Gamma}$.

Суммарную реакцию трения для деформатора можно определить и относительно коэффициентов трения $\mu_{\text{пок ш-}\Gamma}$ покоя и $\mu_{\text{ск ш-}\Gamma}$ скольжения:

$$R_{x \text{ тр}} = (n_{\text{грз}} - 1) R_{x \text{ вп} i} + n_{\text{грз}} R_{x \text{ вт} i} = b_{\text{ш}y} b_{\text{ш}x} \tau_x \cdot 10^6,$$

где τ_x определяют по уравнению (8) при $\tau_x^{\text{уст}} = p_z \mu_{\text{ск ш-}\Gamma}$, а $a_c = c_{\text{ш-}\Gamma} = p_z (\mu_{\text{пок ш-}\Gamma} - \mu_{\text{ск ш-}\Gamma})$.

На второй фазе (см. рис. 9, б) $P_x = R_{x 2}$, грунт перед лобовой поверхностью и между грунтозацепами начинает сжиматься и сдвигаться относительно основного массива, выступы скользят, а впадины частично скользят по грунту или неподвижны относительно защемленного между ними грунта, т. е.

$$R_{x 2} = R_{\text{отп лоб}} + (n_{\text{грз}} - 1) R_{x \text{ грз} i} + R_{x \text{ вт} i},$$

где $R_{x \text{ грз} i}$ — реакция, воспринимаемая зоной грунтозацепа и равная меньшему из значений реакций $R_{x \text{ сж} i}$ сжатия и $R_{x \text{ сд} i}$ сдвига грунта:

$$R_{x \text{ сж} i} = R_{x \text{ вп} i} + R_{x \text{ вт} i} + R_{x \text{ отп} i}; R_{x \text{ сд} i} = b_{\text{ш}y} t_{\text{грз}} \tau_{x \text{ сд} i} \cdot 10^6,$$

$\tau_{x \text{ сд} i}$ — напряжения, определяемые по формуле (8) при $j_{xm} = K_{\text{сж} \Gamma} t_{\text{грз}}$.

На третьей фазе грунт между грунтозацепами полностью сжат и защемлен (см. рис. 9, в), а деформатор (теперь уже плоский) может перемещаться относительно массива грунта по поверхностям, лежащим ниже поверхности контакта (подшвы деформатора), при нормальных давлениях, значительно меньших несущей способности

грунта. Продольная реакция R_{x3} в этом случае обусловлена реакцией $R_{\text{отп лоб}}$ и общей реакцией сдвига $R_{x \text{ сд}}$ деформатора длиной $b_{шx}$:

$$R_{x3} = R_{\text{отп лоб}} + R_{x \text{ сд}},$$

где $R_{x \text{ сдг}} = b_{шy} b_{шx} \tau_{x3} \cdot 10^6$, а τ_{x3} определяют по формуле (8) для деформатора длиной $b_{шx}$ с параметрами φ_{Γ} и c_{Γ} .

В зависимости от свойств деформируемых ОП, размеров деформатора и режима нагружения максимальная реакция R_x^{max} может возникать в любой фазе, поэтому ее значение необходимо оценивать.

Расчетное значение $R_x = P_x$ зависит от соотношений между R_{x2} , R_{x3} , j_x и $j_{xmb} = K_{\text{сжг}} b_{шx}$. Так, $R_x = R_{x2}$ и $R_x = R_{x3}$ при $j_x > j_{xmb}$ и $R_{x2} > R_{x3}$.

Необходимо также учитывать возможное снижение несущей способности грунта при приложении P_x и появление дополнительных $\Delta h_{\Gamma z}$ вертикальной и $\Delta h_{\Gamma x}$ горизонтальной деформаций.

Приведенные на рис. 10 зависимости позволяют определять изменение коэффициента продольной реакции $k_{R_x} = R_x/P_x$ и анализировать влияние на него параметров деформатора, включая количество и размеры грунтозацепов, и нормальных нагрузок.

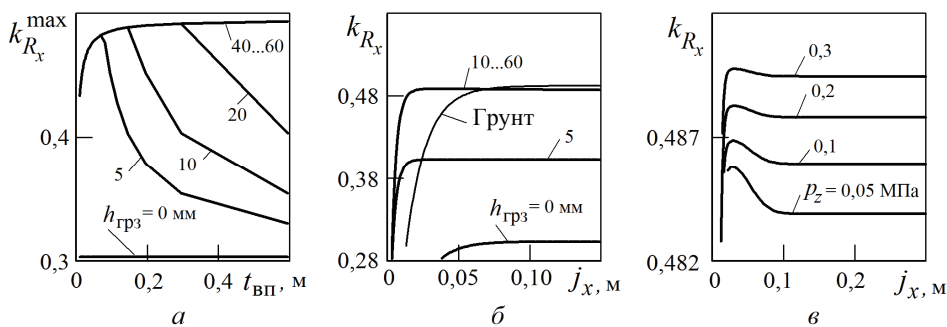


Рис. 10. Изменение параметров сдвига плоского деформатора 0,2×0,6 м на песке пылеватом рыхлом высотой $H_{\Gamma} = 0,4$ м при $\bar{p}_z = 0,1$ МПа и $t_{\text{вт}} = 5$ мм:

a — максимальных значений; *б* — при $h_{\text{Грз}} = 5$, $t_{\text{вп}} = 145$ мм; *в* — при $h_{\text{Грз}} = 20$ мм, $h_{\text{Грз}} = 6$, $t_{\text{вп}} = 115$ мм

Большинство исследователей до настоящего времени предпочитают использовать в расчетах формулу (4), основное достоинство которой заключается в простоте. Однако отмеченные в работе недостатки снижают эффективность ее применения на практике. Зависимости (8) расширяют возможности оценки опорной проходимости ТС, особенно при криволинейном движении и широком изменении диапазона параметров деформаторов (движителей), а также действующих на них нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. — 391 с.
2. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. — М: Машиностроение, 1981. — 232 с.
3. Бойков В.П., Белковский В.Н. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин. — М.: Агропромиздат, 1988. — 240 с.
4. Рукавишников С.В. Особенности взаимодействия гусеничного движителя снегоходных машин с полотном пути. — Горький: ГПИ им. А.А. Жданова, 1979. — 94 с.

Статья поступила в редакцию 09.10.2012