



УДК 621.929

**Сахапов Р.Л.** – доктор технических наук, профессорE-mail: [rustem@sakhapov.ru](mailto:rustem@sakhapov.ru)**Махмутов М.М.** – кандидат технических наук, старший преподавательE-mail: [maratmax@yandex.ru](mailto:maratmax@yandex.ru)**Земдиханов М.М.** – кандидат технических наук, доцентE-mail: [mr.minsur@mail.ru](mailto:mr.minsur@mail.ru)**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Экспериментальная модель влияния влажности и типа почв на удельное сопротивление сдвигу

#### Аннотация

*Постановка задачи.* В летний период работы движители транспортно-технологических машин чаще контактируют с переувлажненной почвой, находящейся в пластичном состоянии, поэтому данное ее состояние при исследовании представляет наибольший интерес. Диапазон влажности, при котором почва находится в пластичном состоянии, характеризуется числом пластичности  $J_p$ . Поставлена и решена задача исследования – составить модель влияния влажности и типа почв на удельное сопротивление сдвигу.

*Результаты.* После обработки экспериментальных исследований получены модели влияния влажности и типа почв на удельное сопротивление сдвигу. С повышением  $W_o$  величина удельного сопротивления почвы сдвигу снижается. С уменьшением глинистых частиц в почве значимость данного фактора на отклик функции также снижается. С повышением удельного веса почвы  $\gamma_s$  для пластических почв увеличивается, а для текучих – снижается, что объясняется уменьшением  $\phi_o$ .

*Выводы.* В результате решения данной задачи на ЭВМ получили следующие экспериментальные модели, отражающие в закодированном виде влияние значимых факторов на внутреннее сцепление частиц почвы и угол внутреннего трения соответственно.

**Ключевые слова:** относительная влажность, удельный вес, угол внутреннего трения, удельное сопротивление почвы сдвигу, давление.

#### Введение

Почва в зависимости от степени влажности может находиться в трех состояниях: твердом, пластичном и текучем. В летний период работы движители транспортно-технологических машин чаще контактируют с переувлажненной почвой [1, 2], находящейся в пластичном состоянии, поэтому данное ее состояние при исследовании представляет наибольший интерес. Диапазон влажности, при котором почва находится в пластичном состоянии, характеризуется числом пластичности  $J_p$  [3]. Анализ литературных источников [4-7] показывает, что  $J_p$  можно определить по формуле:  $J_p = 0,6 \cdot G_{гг}$ . В расчетах удобнее пользоваться  $\gamma_s$ , далее получим:

$$G_{гг} = (\gamma_s - 25) \cdot 10 \Rightarrow J_p = 0,6 \cdot (\gamma_s - 25) \cdot 10. \quad (1)$$

Относительную влажность, при которой наступает предел пластичности  $W_o^{\text{II}}$  (%) от удельного веса почвы, можно определить:  $W_o^{\text{II}} = (\gamma_s - 20) \cdot 4$ . Относительную влажность, при которой наступает предел текучести  $W_o^{\text{T}}$  (%) от удельного веса почвы, определим:

$$W_o^{\text{T}} = W_o^{\text{II}} + J_p = (\gamma_s - 20) \cdot 4 + 0,6 \cdot (\gamma_s - 25) \cdot 10. \quad (2)$$

#### Результаты исследований и их обсуждение

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что в диапазонах перехода почв из твердого в пластичное, из пластичного в текучее состояние силы сопротивления сдвигу изменяются по кривой с различным характером ускорений. Однако в диапазоне влажности пластичного состояния почвы можно принять линейный характер влияния исследуемых факторов на отклик функции (рис. 1, 2).

В табл. 1 приведены значения  $\gamma_s$  от содержания глинистых частиц, пределов пластичности и текучести (по Качинскому Н.А.), в табл. 2 – значения  $c_o$  и  $\phi_o$  (по Агейкину Я.С.).

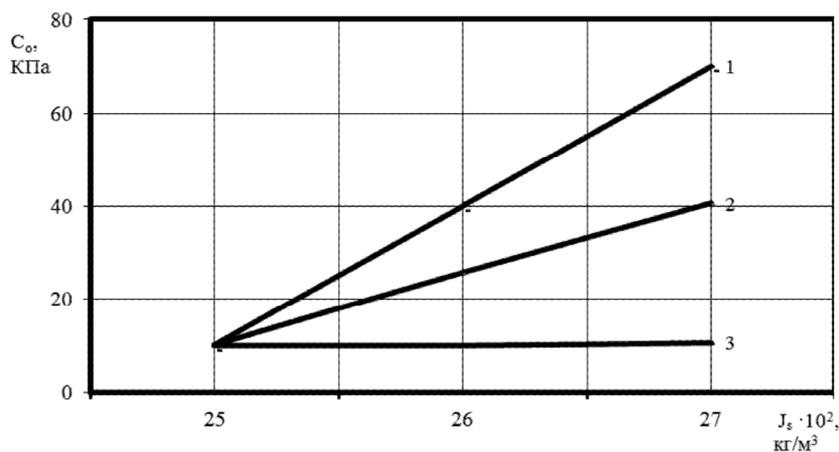


Рис. 1. Зависимость внутреннего сцепления почвы от влажности и удельного веса почвы:  
1 –  $W_{оп}$ ; 2 –  $0,5 \cdot W_{от}$ ; 3 –  $W_{от}$ ;  $\phi_0^0$

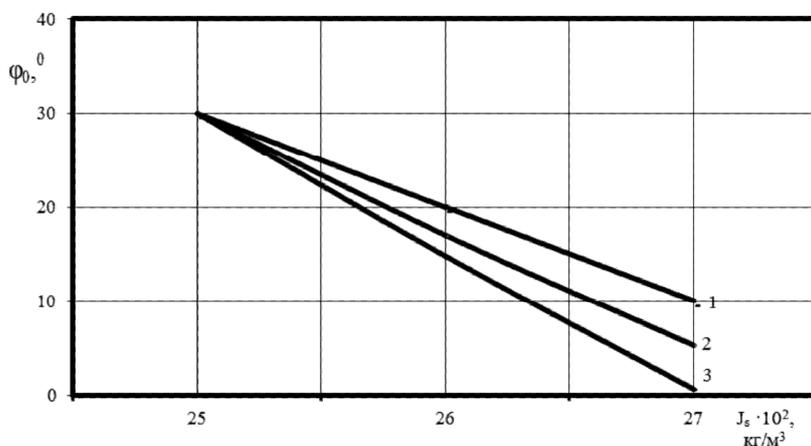


Рис. 2. Зависимость угла внутреннего трения от влажности и удельного веса почвы:  
1 –  $W_{оп}$ ; 2 –  $0,5 \cdot W_{от}$ ; 3 –  $W_{от}$

Таблица 1  
Зависимость  $\gamma_s$  от содержания глинистых частиц, пределов пластичности и текучести [5]

$\gamma_s$ , кг/м <sup>3</sup>	Содержание глинистых частиц, %	$n_{пластич.}$	$W_o^II$ , %	$W_o^I$ , %
2550	0	0	20	20
2650	10	6	24	30
2750	20	12	28	40
2850	30	18	32	50

Таблица 2  
Значения  $c_0$  и  $\phi_0$  [6]

№ п/п	$\gamma_s$ , кг/м <sup>3</sup>	$W_o$ , %	$c_0$ , кПа	$\phi_0$ , в град.
1	2550	17,3	11,0	30,0
2	2850	33,0	78,0	10,0
3	2550	18,0	8,0	30,0
4	2850	52,0	9,0	3,0
5	2650	28,0	40,0	20,0
6	2650	26,0	9,5	16,5
7	2550	18,0	9,0	30,0
8	2850	51,0	10,0	3,0
9	2650	32,5	26,0	18,3

В результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ получили математические модели, отражающие влияния значимых факторов на внутреннее сцепление частиц почвы  $c_0$  и угол внутреннего трения  $\varphi_0$  соответственно:

$$c_0 = 26,3 - 16,8X_1 + 16,3X_2 - 15,8X_1X_2, \quad (3)$$

$$\varphi_0 = 18,3 - 1,8X_1 - 11,8X_2 - 1,8X_1X_2, \quad (4)$$

где  $c_0$  – внутреннее сцепление частиц почвы, кПа;  $\varphi_0$  – угол внутреннего трения, град.;

$$X_1 = \frac{W_0 - 0,5W_0^T}{0,5W_0^T}, \quad X_2 = \frac{g_s - 27,5}{2,5},$$

соответственно относительная влажность и удельный вес почвы в закодированном виде.

Анализируя коэффициенты регрессии с соответствующим доверительным интервалом видим (5), что наибольшее влияние на  $\varphi_0$  оказывает фактор  $W_0$ . Влияние фактора ниже на 3 %. Что же касается коэффициентов факторов при парных взаимодействиях, то их влияние ниже доверительного интервала.

С повышением  $W_0$  величина силы сцепления снижается. С уменьшением глинистых частиц в почве значимость данного фактора на отклик функции также снижается. С повышением удельного веса почвы  $c_0$  снижается, а с повышением влажности уменьшается.

Анализ математической модели (4) показывает, что наибольшее влияние на угол внутреннего трения оказывает фактор удельного веса почвы.

Влияние влажности почвы ниже на 82 % относительно фактора  $\gamma_s$ . Анализируя коэффициенты факторов при парных взаимодействиях видно, что влияние его также ниже на 85,1 % относительно фактора удельного веса почвы [7, 8].

С увеличением  $W_0$  угол внутреннего трения при увеличении глинистых частиц в почве снижается [9]. С уменьшением  $c_0$  удельный вес почвы снижается, а с повышением влажности почв  $\gamma_s$  увеличивается [10, 11]. Следовательно, модель влияния влажности и типа почв на удельное сопротивление почвы сдвигу в общем виде можно записать:

$$\tau_{сд} = 26,3 - 16,8X_1 + 16,3X_2 - 15,8X_1X_2 + q \cdot \operatorname{tg}(18,3 - 1,8X_1 - 11,8X_2 - 1,8X_1X_2), \quad (5)$$

где  $q$  – среднее давление на почву, кПа.

В результате обработки экспериментальных данных получим модель, отражающую влияния значимых факторов на удельное сопротивление почвы сдвигу при  $q = 100$  кПа:

$$\tau_{сд} = 61,0 - 20,7X_1 + 7,0X_2 - 19,0X_1X_2. \quad (6)$$

Из математической модели (6) видно, что наибольшее влияние на удельное сопротивление почвы сдвигу оказывает фактор влажности почвы. Влияние удельного веса почвы ниже на 67 %. Анализ факторов при парных взаимодействиях показывает, что влияние  $\gamma_s$  ниже на 8 % относительно фактора влажности почвы.

С увеличением  $W_0$  величина  $\tau_{сд}$  снижается. С уменьшением глинистых частиц в почве значимость данного фактора на  $\tau_{сд}$  снижается. С повышением удельного веса почвы  $\gamma_s$  для пластических почв увеличивается, а для текучих – снижается, это из-за уменьшения  $\varphi_0$  (рис. 2). Данные экспериментальные модели учитывают влияние физико-механических свойств почвы на удельное сопротивление сдвигу (рис. 3).

В исследования теории качения колеса и его контакта с почвой и физики почвы значительный вклад внесли В.П. Горячкин [4], Н.А. Качинский [5], Я.С. Агейкин [6], М.М. Махмутов [7-9], А.Х. Зимагулов [10], Д.И. Золотаревская [11], М.Г. Беккер [12, 13], Р.Л. Сахапов [15, 16], С.А. Сейгер [14] и другие.

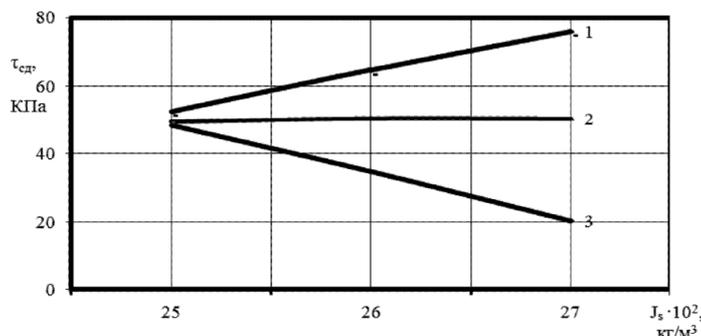


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления почвы сдвигу от влажности и удельного веса:  
1 –  $W_{оп}$ ; 2 –  $0,5 \cdot W_{от}$ ; 3 –  $W_{от}$

Условно разделим почву, находящуюся под штампом, на слои толщиной равной диаметру твердых частиц. Частицы первого слоя давят на частицы второго слоя, которые воспринимаются третьим слоем и т.д. С увеличением глубины  $h_{ш}$  количество частиц, воспринимающих нагрузку повышается, за счет чего величина напряженности, приходящаяся на каждую частицу, уменьшается. Так, если площадь частиц первого слоя равна площади штампа (для квадрата)  $a_{ш}^2$ , то на глубине  $h_{ш}$  она составляет  $A_{ш}^2$ . Значение параметра  $A_{ш}$  зависит от угла давления почвенных частиц на последующие слои  $a_{ш}$ . Выразим данное предположение в математической форме:

$$S_h = A_{ш}^2 = a_{ш}^2 + 2 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{ш} \cdot h_{ш}), \quad (7)$$

где  $S_h$  – площадь почвенного слоя, воспринимающего нагрузку на глубине  $h_{ш}$ .

Количество точек соприкосновений с соседними частицами почвы  $Z_{ш}$  зависит от пористости почвы и его можно представить в логарифмической функции типа:

$$Z_{ш} = \log_a(F_{п}). \quad (8)$$

Показатель основания логарифмической функции «а» определится:

$$a = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}; \Rightarrow a = \left( \sqrt[12]{\frac{1}{0,26}} + \sqrt[8]{\frac{1}{0,32}} + \sqrt[6]{\frac{1}{0,48}} \right) / 3 = 0,885.$$

Следовательно,

$$Z_{ш} = \log_{0,885} \left[ 1 - \frac{1 + \frac{W}{1-W}}{1 + \frac{g_s \cdot W}{g_w \cdot (1-W)} + \frac{V_3}{V_1}} \right]. \quad (9)$$

Учитывая, что напряженность в почвенной частице  $\sigma_{п}$  есть отношение силы на площадь слоя воспринимающего частицей нагрузку, получим:

$$\sigma_{п} = P_{ш} / S_{ш}; \quad (10)$$

- для прямоугольного сечения определим  $S_h$ :

$$S_h = (a_{ш} + 2 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{ш} \cdot h_{ш})) \cdot (b_{ш} + 2 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{ш} \cdot h_{ш})),$$

- для треугольного сечения:

$$S_h = \frac{[(a_{ш} + 2 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{ш} \cdot h_{ш})) \cdot (e_{ш} + 2 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{ш} \cdot h_{ш}))]}{2};$$

- для круглого сечения:

$$S_h = \frac{[p \cdot (d_{ш} + 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ш} \cdot h_{ш})^2]}{4}.$$

Следовательно, для прямоугольного сечения получим:

$$s_{п} = \frac{P_{ш}}{\left( (a_{ш} + 2 \cdot h_{ш} \cdot \operatorname{tg} \left( 131 - \frac{F_{п}}{(3,66 \cdot 10^{-3})} \right)) \right) \cdot \left( b_{ш} + 2 \cdot h_{ш} \cdot \operatorname{tg} \left( 131 - \frac{F_{п}}{(3,66 \cdot 10^{-3})} \right) \right)}. \quad (11)$$

Полученные модели описывают напряженное состояние почв в зависимости от содержания влаги, воздуха, удельного веса почв, параметров и формы штампа. По мере роста напряженности в почве растет также и пористость почвенного ядра.

Пористость почвы можно выразить также через объемный вес (плотность) почвы:

$$F_{п} = 1 - \gamma_{п} / \gamma_s \rightarrow \gamma_{п} = \gamma_s \cdot (1 - F_{п}). \quad (12)$$

Почвенную структуру можно рассматривать как частицу, состоящую из слипшихся мелких частиц. Если элементарную частицу рассматривать как первичную, то последующие образования можно рассматривать как вторичное, третичное и т.д.

Выразим плотность почвы через весовые и объемные показатели ее фаз, получим:

$$g_{п} = \frac{g_1 + g_2}{V_1 + V_2 + V_3}. \quad (13)$$

Учитывая, что:

$$g_1 = g_s \times V_1; g_2 = g_w \times V_2; W_a = \frac{g_2}{g_1 + g_2}; W_o = \frac{g_2}{g_1}; g_2 = W_o \cdot g_1.$$

$$W_a = \frac{g_1 W_o}{g_1 + g_1 W_o} = \frac{W_o}{1 + W_o};$$

$$W_a = W_o - W_a \cdot W_o = W_o \cdot (1 - W_a); W_o = \frac{W_a}{1 - W_a}.$$

Получим:

$$\begin{aligned}
 g_2 &= W_a \cdot (g_1 + g_2) = W_a \cdot g_1 + W_a \cdot g_2; W_a \cdot g_1 = g_2 - W_a \cdot g_2 = g_2 \cdot (1 - W_a); \\
 g_1 &= \frac{g_2 \cdot (1 - W_a)}{W_a}; \Rightarrow g_s \cdot V_1 = \frac{g_{II} \cdot V_2 \cdot (1 - W_a)}{W_a}; \\
 V_1 &= \frac{g_w \times V_2 \times (1 - W_a)}{g_s \times W_a}; \Rightarrow V_2 = \frac{V_1 \times g_s \times W_a}{g_w \times (1 - W_a)},
 \end{aligned} \tag{14}$$

где  $\gamma_w$  – объемный вес воды,  $\gamma_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\gamma_s$  – удельный вес почвы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W_a$  – абсолютная влажность почвы.

Подставляя формулы (14) в модель (15), получим:

$$g_{II} = \frac{g_s \times V_1 + g_w \times V_2}{V_1 + V_2 + V_3} = \frac{g_s \times V_1 + \frac{g_w \times V_1 \times g_s \times W_a}{g_w \times (1 - W_a)}}{V_1 + \frac{V_1 \times g_s \times W_a}{g_w \times (1 - W_a)} + V_3}; \tag{15}$$

$$F_{II} = 1 - \frac{1 + \frac{W_a}{1 - W_a}}{1 + \frac{g_s \cdot W_a}{g_w \cdot (1 - W_a)} + \frac{V_3}{V_1}}. \tag{16}$$

### Определение коэффициентов динамики изменения угла давления (КДУ) и формы почвенного ядра (КФЯ)

Для определения коэффициента динамики изменения угла давления используем следующую формулу, получим:

$$a_{ш} = 131 - \frac{1 - g_g / g_s}{(3,66 \cdot 10^{-3})}. \tag{17}$$

В результате воздействия штампа, плотность почвы увеличивается, следовательно, угол давления изменится и составит:

$$a_{я} = 131 - \frac{1 - g_{я} / g_s}{(3,66 \cdot 10^{-3})}, \tag{18}$$

где  $\gamma_{я}$  – плотность почвенного ядра под штампом,  $\text{кг/м}^3$ .

Тогда теоретическая модель КДУ определится:

$$K_a = \frac{a_{ш}}{a_{я}} = \left[ 131 - \frac{1 - g_{II} / g_s}{(3,66 \cdot 10^{-3})} \right] : \left[ 131 - \frac{1 - g_{я} / g_s}{(3,66 \cdot 10^{-3})} \right]. \tag{19}$$

Полученная модель (19) позволяет определить экспериментальные значения КДУ в зависимости от параметров штампа и свойств почв.

Форма поперечного сечения и длина образовавшегося почвенного ядра зависят в основном от формы штампа, липкости почвы, определяющейся типом, минералогическим составом и влажностью. Геометрическая связь между длиной ядра  $l_{я}$ , параметром штампа  $a_{ш}$  и углом при вершине  $a_{ш}$  выразится (рис. 4):

$$l_{я} = \frac{a_{ш}}{2 \cdot \text{tg} a_{ш}}. \tag{20}$$

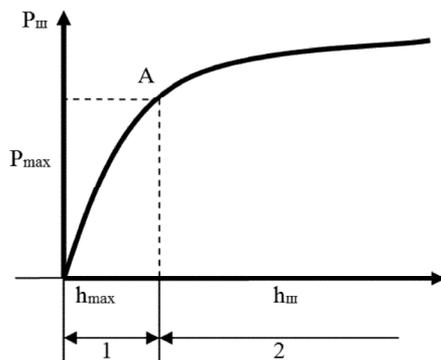


Рис. 4. Зависимость силы сопротивления почвы смятию от деформации

Объем почвы, сжатой штампом, образует почвенное ядро, тогда для пирамидальной (конусообразной) формы почвенного ядра, получим:

$$V_{\text{я}} = \frac{S \cdot l}{3} \cdot \frac{g_n}{g_{\text{я}}}; \frac{g_n}{g_{\text{я}}} = \frac{V_n}{V_{\text{я}}}; V_n = S_{\text{ш}} \cdot h_{\text{max}}; \quad (21)$$

$$\frac{1-F_{\text{я}}}{1-F_n} = \frac{3 \cdot h_{\text{max}}}{l_{\text{я}}} \Rightarrow h_{\text{max}} = \frac{l_{\text{я}} \cdot (1-F_{\text{я}})}{3 \cdot (1-F_n)}; g_{\text{я}} = g_s \cdot (1-F_{\text{я}}); g_n = g_s \cdot (1-F_n).$$

На практике форма почвенного ядра не всегда имеет конусообразную форму, и с целью ее корректировки введем поправочный коэффициент формы почвенного ядра. Используя модель (21), КФЯ определится:

$$e_{\text{я}} = \frac{3 \cdot c_o \cdot (1-F_n)}{(1-F_{\text{я}}) \cdot (1 - \sin(K_a \cdot a_{\text{ш}}) \cdot \text{tg} j_o) \cdot l_{\text{я}} \cdot \cos(K_a \cdot a_{\text{ш}}) \cdot K_t}. \quad (22)$$

Таким образом, зная плотность почвы, ядра и коэффициент объемного смятия по моделям (19), (22), можно определить экспериментальные значения КДУ и КФЯ в зависимости от параметров штампа и свойства почв.

### Выводы

1. С увеличением относительной влажности величина силы сцепления снижается. С уменьшением глинистых частиц в почве значимость данного фактора также снижается. С повышением  $\gamma_s$  почвы  $c_o$  снижается, а с повышением ее влажности уменьшается.

2. С повышением влажности почв  $\phi_o$  при увеличении глинистых частиц в почве снижается. С уменьшением  $\gamma_s$   $\phi_o$  снижается, а с повышением влажности почв  $\gamma_s$  увеличивается. С увеличением плотности почвы растет также ее напряженное состояние.

### Список библиографических ссылок

1. Абсалямова С. Г., Сахапов Р. Л. Глобальное партнерство в сфере трансфера технологий как фактор сокращения инновационного разрыва // Известия КГАСУ. 2013. № 3 (25). С. 193–198.
2. Сахапов Р. Л., Мазитов Н. К., Рахимов Р. С., Лобачевский Я. П., Галяутдинов Н. Х., Шарафиев Л. З. Влажно- и энергосберегающая технология обработки почвы и посева в острозасушливых условиях // Техника и оборудование для села. 2013. № 3 (189). С. 2–6.
3. Габдуллин Т. Р., Загретдинов Р. В., Сахапов Р. Л. Моделирование систем управления дорожно-строительной техникой // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. т. 16. № 1 (2). С. 394–396.
4. Горячкин В. П. Собрание сочинений. в 3 т. М. : Колос, 1968. 328 с.
5. Качинский Н. А. Физика почв. М. : Высшая школа, 1965. 323 с.
6. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей: учеб. пособие для ВУЗов. М. : Машиностроение, 1981. 232 с.
7. Махмутов М. М. Оптимизация параметров конусности стойки устройства противоскольжения // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 6. С. 31–33.
8. Махмутов М. М., Сахапов Р. Л. Параметры упаковок различных типов грунтов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (32). С. 294–299.
9. Устройство противоскольжения для колеса транспортного средства : пат. 2453445 Рос. Федерация. № 2010150215/11 ; заявл. 07.12.2010 ; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. 2 с.
10. Зимагулов А. Х., Юлдашев А. К. Повышение тягово-сцепных качеств колесных тракторов. Казань : Татарское книжное издательство, 1975. 64 с.
11. Золотаревская Д. И. Взаимосвязь различных математических моделей деформирования почвы // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1983. № 5. С. 10–16.
12. Bekker M. G. Wheels and track // Journal Automobile engineers. 1955. № 6. P. 15–17.

13. Bekker M. G. Off-the-Road Lokomotion : research and development in Terramechanics. The Univ. of Michigan Press. AnnArbor. Mich, 1960. P. 16–18.
14. Ceiger F. A. Reifen für die Landwirtschaft // Der Land und Forstwirtschaftliche Betrieb. 1987. № 2. P. 6–8.
15. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems // Journal of Physics: Conference Series. 2016. T. 738. № 1. C. 012008.
16. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Modeling the dynamics of the chassis of construction machines // Journal of Physics: Conference Series. 2016. T. 738. № 1. C. 012119.

**Sakhapov R.L.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [rustem@sakhapov.ru](mailto:rustem@sakhapov.ru)

**Makhmutov M.M.** – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: [maratmax@yandex.ru](mailto:maratmax@yandex.ru)

**Zemdikhanov M.M.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [mr.minsur@mail.ru](mailto:mr.minsur@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Experimental model of influence of moisture and soil type on shift resistivity

#### Abstract

*Problem statement.* In summer, drivers of transport-technological machines often work in contact with waterlogged soil, which is in plastic condition, so the given condition in the study is of most interest. Humidity range in which the soil is in a plastic state, is characterized by a number of plasticity  $J_p$ . Set and solved the problem of the study is to make a mathematical model of the influence of moisture and type of soil on  $\tau_{сн}$ .

*Results.* After processing the experimental research model of the influence of moisture and type of soil on resistivity shift. With increasing  $W_o$ , the value of the specific resistance of soil to shear is reduced. With a decrease in clay particles in the soil the importance of this factor on the response functions is also reduced. With the increase of the specific weight of the soil  $\gamma_s$  for a plastic soil increases, and the fluid is reduced due to the reduction of angle of  $\varphi_o$ .

*Conclusions.* The solution of this problem on a computer received the following experimental models that reflect in coded form the influence of important factors on the internal cohesion of soil particles and the angle of internal friction, respectively.

**Keywords:** relative humidity, specific weight, angle of internal friction, unit soil resistance to shear pressure.

#### References

1. Absalyamova S. G., Sakhapov R. L. Global partnership in the field of technology transfer as a factor of reduction of the innovation gap // Izvestiya KGASU. 2013. № 3 (25). P. 193–198.
2. Sakhapov R. L., Mazitov N. K., Rakhimov R. C., Lobachevsky Y. P., Galyautdinov N. X., Sharafiev L. Z. Water- and energy-saving technology of soil tillage and sowing in high-draught conditions // Technica i oborudovaniye dlya sela. 2013. № 3 (189). P. 2–6.
3. Gabdullin T. R., Zagretidinov R. V., Sakhapov R. L. the Modeling of control systems of road-building equipment // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2014. vol. 16. № 1 (2). P. 394–396.
4. Goryachkin V. P. Collected works; 3 vol. M. : Kolos, 1968. 328 p.
5. Kaczynski N. A. Physics of soils. M. : Vishaya schola, 1965. 323 p.
6. Ageikin J. S. Permeability of vehicles: Textbook: Visaya schola. M. : Mashinostroenie, 1981. 232 p.

7. Makhmutov M. M. Optimization of parameters of taper of the strut device chains // Tractori i chelhozmachinye. 2013. № 6. P. 31–33.
8. Makhmutov M. M., Sakhapov R. L. Parameters of packages of different types of soils // Izvestiya KGASU. 2015. № 2 (32). P. 294–299.
9. Anti-skid device for the wheels of the vehicle, the application : pat. № 2453445 Rus. Federation. № 2010150215/11 ; decl. 07.12.2010 ; publ. 20.06.2012. Bull. № 17. 2 p.
10. Zimagulov A. H., Yuldashev A. K. Improve traction qualities of wheeled tractors. Kazan : Tatarskoe knignoe izdatelstvo, 1975. 64 p.
11. Zolotarevskaya I. D. Relationship of different mathematical models of deformation of the soil // Mechanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo hoziystva. 1983. № 5. P. 10–16.
12. Bekker M. G. Wheels and track // Journal Automobile engineers. 1955. № 6. P. 15–17.
13. Bekker M. G. Off-the-Road Lokomotion : research and development in Terramechanics. The Univ. of Michigan Press. AnnArbor. Mich, 1960. P. 16–18.
14. Ceiger F. A. Reifen für die Landwirtschaft // Der Land und Forstwirtschaftliche Betrieb. 1987. № 2. P. 6-8.
15. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems // Journal of Physics: Conference Series. 2016. T. 738. № 1. P. 012008.
16. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Modeling the dynamics of the chassis of construction machines // Journal of Physics: Conference Series. 2016. T. 738. № 1. P. 012119.