УДК 624.132.3

О ВЛИЯНИИ СКОРОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН НА СИЛУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА РЕЗАНИЮ

Д.С. Семкин ФГБОУ ВО «СибАДИ». Россия. г. Омск

Аннотация. Рассмотрены процессы, происходящие при скоростном резании грунтов. Установлена зависимость силы сопротивления грунта резанию от скорости взаимодействия с учетом сжимаемости грунта и возникновением силы волнового сопротивления. Приведены аналитические зависимости для расчета составляющих полной силы сопротивления скоростного резания грунта. Проанализирована зависимость удельной энергоемкости процесса резания от скорости и приведены практические рекомендации для выбора рациональной скорости резания.

Ключевые слова: сила сопротивления грунта резанию, скорость резания, сжимаемость грунта, волна сжатия грунта, сила волнового сопротивления, энергоемкость процесса резания, рациональная скорость резания.

ВВЕДЕНИЕ

Грунт является трехфазной дисперсной средой со сложными структурными связями. Особенности строения, а также разнообразие видов грунтов, обладающих различными физическими и физико-механическими свойствами, затрудняет описание процессов, происходящих при взаимодействии его с рабочими органами различного рода.

Тем самым для выбора параметров рабочих органов при проектировании землеройных и других видов машин чрезвычайно важным



Рис. 1. Сопоставление всей силы сопротивления резанию с частью ее, расходуемой на сообщение движения грунту, отделяемому от массива (заштрихованная часть графика), для серо-зеленой мергелистой глины согласно Ю.А. Ветрову является определение сил, возникающих при работе. При современном уровне интенсификации процессов важной задачей становится установление зависимости влияния скорости на силу сопротивления грунта резанию.

Экспериментальные исследования скоростного резания грунтов на маятниковом стенде, проведенные Ю.А. Ветровым [1], а также исследования других ученых, показали, что при увеличении скорости наблюдается значительное возрастание силы сопротивления грунтов резанию.

Согласно Ю.А. Ветрову данное увеличение силы сопротивления резанию не может быть полностью объяснено только силами отбрасывания срезанного грунта (рис. 1) [1].

Остальная часть приращения силы скоростного резания объясняется им предположительно внутренними процессами, протекающими в грунте с конечной скоростью: изменением ориентации частиц и объема пор, а также вытеснением воды из пор, вытеснением и сжатием газовой фазы грунта.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НА СИЛУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА РЕЗАНИЮ

Согласно приведенному графику, общая зависимость силы сопротивления резанию от скорости взаимодействия соответствует уравнению

$$y = A + f(x^B), \tag{1}$$

где A – параметр, определяющий статическую силу сопротивления резанию при скорости

взаимодействия близкой к нулю; f(x^в) – функция влияния скорости на силу сопротивления грунта резанию.

Статическая составляющая полной силы резания может быть определена с помощью эмпирической теории А.Н. Зеленина [2], теории К.А. Артемьева [3], базирующейся на статике сыпучей среды В.В. Соколовского, методом создания конечно-элементной структуры на основе теории сплошной среды и других.

Рассмотрим функцию влияния скорости на силу сопротивления грунтов резанию. Считаем, что часть силы сопротивления резанию увеличивается в результате изменения кинетической энергии грунта.

Согласно теореме о кинетической энергии материальной точки – работа по изменению кинетической энергии движущегося объекта равна разности кинетических энергий, которыми обладает объект до и после совершения механической работы [1].

Так как изначально грунтовый массив является неподвижным [1]

$$Ach = E,$$
(2)

где Асн – работа силы скоростного напора грунтовой среды; Е – кинетическая энергия, которой обладает срезанный грунт.

Работа силы скоростного напора грунтовой среды на рабочий орган [1]

$$A = FcH \cdot dL, \tag{3}$$

где Fcн – сила скоростного напора грунта; dL – элементарный путь, пройденный рабочим органом.

Кинетическая энергия, которой будет обладать движущийся грунт [1]

$$E = \frac{Mzp \cdot V^2}{2} = \frac{S \cdot p \cdot dL \cdot V^2}{2}, \qquad (4)$$

где Мгр – масса срезанного грунта на пути dL; V – скорость резания; S – площадь срезаемой стружки; ρ – плотность грунта.

Таким образом, с учетом равенства (2), давление и сила скоростного напора грунта соответственно

$$PCH = \rho \cdot \frac{V^2}{2}; \tag{5}$$



Рис. 2. Давление грунтового потока на рабочий орган

$$= CH = S \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2}.$$
 (6)

Полученная зависимость (5) показывает дополнительное давление, оказываемое на рабочий орган кроме статического, в результате придания грунту скорости, в данном случае равной скорости движения рабочего органа или в случае рассмотрения движения на рабочий орган грунтового потока полное его торможение.

При рассмотрении процессов, происходящих при скоростном взаимодействии, требуется также учитывать сжимаемость грунтовой среды. Так как процесс сжатия, согласно первому закону термодинамики, требует дополнительных затрат энергии.

Так как грунт имеет невысокие значения теплопроводности, а взаимодействие рабочих органов с грунтом является скоростным (т.е. быстропротекающим в выделенном малом объеме), то с достаточной долей достоверности можно считать процесс взаимодействия адиабатическим.

При ударном и виброударном воздействии на грунтовый массив, по всей видимости, следует учитывать возникновение ударных волн с образованием, так называемых скачков уплотнения и появлением участков с различной энтропией. Однако для рабочих органов безударного действия подобные скорости взаимодействия являются практически недостижимыми.

Поэтому процесс взаимодействия рабочих органов с грунтовой средой можно считать изоэнтропическим адиабатным.

Согласно уравнению, характеризующему сохранение энергии вдоль линии тока несжимаемого грунтового потока, надвигающегося

на рабочий орган, полная энергия потока равна (рис. 2) [6]

$$g \cdot z + \frac{V^2}{2} + \frac{Pcm}{\rho} = \text{const},$$
(7)

где g – ускорение свободного падения; z – высота относительно начала координат; V – скорость грунтового потока, надвигающегося на рабочий орган; Рст – статическое давление грунтовой среды на рабочий орган при скорости взаимодействия близкой к нулю.

Так как потенциальная энергия давления столба грунта учитывается при определении Рст с помощью теорий статики, то ее можно исключить из уравнения. Однако в реальном процессе плотность грунта не является постоянной вдоль линии тока, так как в области непосредственной близости к рабочему органу происходит сжатие грунта за счет торможения грунтового потока.

Тогда уравнение (7) для случая полного торможения потока с учетом сжимаемости [6] грунтовой среды приобретает вид

$$\frac{V^2}{2} + \int \frac{\mathrm{d}P}{\rho} = \mathrm{const},\tag{8}$$

где dP – давление грунта в точке; р – плотность грунта в точке.

 $\int \frac{\mathrm{d}P}{0}$

Для вычисления интеграла ^Ј ρ , воспользуемся уравнением Пуассона для адиабатического процесса, которое описывает процесс изменения состояния среды и показывает как изменяется плотность среды при изменении ее давления [6].

$$\frac{P_0}{\rho_0^{\kappa}} = \frac{P}{\rho^{\kappa}} = \text{const};$$
(9)

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{P^{\frac{1}{\kappa}}}{\rho_0^{\frac{1}{\kappa}}} = \frac{P^{\frac{1}{\kappa}}}{C^{\frac{1}{\kappa}}},$$
(10)

r dP

где к – показатель адиабаты процесса; С – постоянная.

$$\frac{V^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{P}{\rho} = \text{const.}$$
(11)

Показатель адиабаты процесса для твердых тел может быть определен как отношение удельной теплоемкости при постоянном напряжении Со к удельной теплоемкости при постоянной деформации Сε или соотношением адиабатического модуля упругости Еа к изотермическому модулю упругости Е [4]

$$\kappa = \frac{C\sigma}{C\varepsilon} = \frac{E\alpha}{E}.$$
(12)

Теоретически показатель адиабаты процесса может быть определен с помощью уравнения, предложенного Томсоном [4]

$$\kappa = 1 + \frac{At \cdot \alpha^2 \cdot K \cdot \theta}{\omega \cdot C\varepsilon}, \tag{13}$$

где At – тепловой эквивалент механической работы, затраченной на деформацию тела; α – температурный коэффициент объемного расширения; К – изотермический модуль объемного сжатия упругого тела; θ – абсолютная температура тела; ω – плотность тела.

Для практического применения зависимостей, включающих показатель адиабаты процесса, изотермический и адиабатический модули упругости грунтовой среды могут быть получены с помощью установок статического и динамического нагружения, широко применяющихся в дорожном строительстве для определения статического и динамического модулей упругости грунтовых дорожных оснований [5].

Согласно выводам профессора Ю.М. Яковлева для глинистых грунтов соотношение модулей упругости при кратковременной Ед и длительной нагрузке Ест зависит от относительной влажности грунта и колеблется в пределах [5]

$$\frac{E\partial}{Ecm} = 1,25 \div 1,75.$$
 (14)

Для учета сжимаемости грунтовой среды на процесс скоростного взаимодействия воспользуемся критерием Маха – отношением скорости потока к местной скорости распространения деформаций в среде [6]

$$M = \frac{V}{V\partial},$$
(15)

где Vд – скорость распространения деформаций в среде.

Как известно из теории гидрогазодинамики скорость распространения малых возмущений в сжимаемой среде [6]

$$V\partial = \sqrt{\frac{\kappa \cdot P}{\rho}},\tag{16}$$

где Р – давление внутри области возмущенной среды.

Тогда уравнение (11) примет вид

$$\frac{V^2}{2} + \frac{V\partial^2}{\kappa - 1} = \text{const.}$$
(17)

Вязкопластические свойства грунтового потока могут быть рассмотрены с помощью коэффициента Кориолиса, который учитывает распределение скорости частиц по сечению потока.

Запишем уравнение (17) для сечения, проходящего через точку торможения грунтового потока и сечения удаленного от рабочего органа, где процесс сжатия грунта не проявляется

$$\frac{V_0^2}{2} + \frac{V\partial_0^2}{\kappa - 1} = \frac{V^2}{2} + \frac{V\partial^2}{\kappa - 1}.$$
 (18)

 $V\partial^2$

Разделим уравнение (18) на κ – 1, с учетом того, что V₀ = 0 получим

$$\frac{V\partial_0^2}{V\partial^2} = \frac{\kappa - 1}{2} \cdot \frac{V^2}{V\partial^2} + 1;$$
(19)

$$\frac{V\partial_0^2}{V\partial^2} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M^2.$$
(20)

Исходя из гидрогазодинамического равенства [6]

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{V\partial_0^2}{V\partial^2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}.$$
(21)

Следует

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2}M^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}},\tag{22}$$

где Р₀ – полное давление грунтового потока в точке торможения; Р – статическое давление грунтовой среды в точке торможения потока.

Согласно В.П. Станевскому для определения скорости распространения упругопластических деформаций грунта применима зависимость [7]

$$V\partial = \sqrt{\frac{r}{\rho}},\tag{23}$$

где т – предельное касательное напряжение грунта.

Для практического применения расчетной зависимости (23) можно использовать данные В.П. Фомичева о прочностных и деформативных характеристиках грунтов [8].

На основании этих выводов можно представить классификацию грунтов по А.Н. Зеленину [9], дополненную значениями скорости распространения упругопластических деформаций грунта (табл.).

Категория	I (песок)	II (супесь)	III (суглинок)	IV (глина)	V	VI
Су	$\frac{1 \div 4}{3}$	<u>5 ÷ 8</u> 6	<u>9 ÷ 15</u> 12	<u>16 ÷ 34</u> 25	<u>35 ÷70</u> 50	<u>70 ÷ 140</u> 100
Куд, кН/м²	<u>12 ÷ 65</u> 38,5	<u>58 ÷ 130</u> 94	<u>120 ÷ 200</u> 160	<u>180 ÷ 300</u> 240	<u>280 ÷ 500</u> 390	<u>400 ÷ 800</u> 600
Vд, м/с	2,5	3,5	4,9	7,6	10,4	14,7

КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУНТОВ ПО А.Н. ЗЕЛЕНИНУ, ДОПОЛНЕННАЯ ЗНАЧЕНИЯМИ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Таким образом, полное давление грунтового потока на рабочий орган с учетом сжимаемости грунта

$$P = Pcm \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}};$$
(24)

$$P = Pcm \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot \frac{V^2}{V\partial^2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}.$$
 (25)

Определение силы сопротивления грунтов резанию в случае известного распределения давления по рабочему органу (например, при расчете методом конечных элементов) может осуществляться по общей зависимости

$$F = \iint_{S} Pcm(x, y, z) dS \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot \frac{V^2}{V\partial^2}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \cdot (\sin\delta + tg\varphi \cdot \cos\delta),$$
(26)

где δ – угол между касательной к поверхности рабочего органа и вектором его скорости; φ – угол внешнего трения грунта.

В простейшем случае

$$F = Ky\partial \cdot S \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot \frac{V^2}{V\partial^2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}},$$
(27)

где Куд – удельная сила сопротивления резанию.

Следует отметить, что при рассмотрении процесса внедрения в грунт тел с малыми углами режущей поверхности относительно направления его движения давление грунтовой среды следует рассчитывать без полного ее торможения внедряемым телом.

Для практического применения можно использовать упрощенную зависимость скорости торможения потока (деформации) V в зависимости от скорости движения рабочего органа Vpo

$$V = Vpo \cdot \sin(\delta + \varphi).$$
(28)

Очевидно, что при угле резания равном (90° – φ) < δ < (90° + φ) скорость деформации грунта равна скорости рабочего органа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, приведенные зависимости позволяют описать процесс скоростного резания грунта, определить полную силу сопротивления

резанию с учетом статической составляющей Fct, силы скоростного напора Fcн и волнового сопротивления Fвс, возникающего в результате сжатия грунтовой среды рабочим органом.

На рис. 3 представлены теоретические зависимости, полученные по формулам (6) и (27), силы резания от скорости движения рабочего органа для глинистых грунтов IV категории согласно данным табл. 1, аналогичные экспериментальным, полученным Ю.А. Ветровым (рис. 1) [1].



Рис. 3. Сопоставление полной силы сопротивления резанию со статической силой и силой скоростного напора, полученных по теоретическим зависимостям, (ширина среза 0,1 м, толщина 0,1 м, угол резания 30°)

Влияние скорости на силу сопротивления резанию согласно приведенным теоретическим зависимостям для талых грунтов с I по IV категорию наглядно представлено на рис. 4. Примечательным является то, что при скорости около 5 м/с сила сопротивления резанию для грунтов различных категорий практически совпадает.



Рис. 4. Влияние скорости на силу сопротивления резанию грунтов с I по IV категорию

Согласно экспериментальным исследованиям А.И. Сургучева и других [9] на величину приращения силы сопротивления грунта резанию при увеличении скорости влияет также угол резания, причем меньшее приращение силы наблюдается при меньшем угле резания. На рис. 5 приведены зависимости силы сопротивления резанию от скорости при различных углах резания для суглинистых грунтов III категории, полученные по формулам (26) и (28).



Рис. 5. Зависимость силы сопротивления грунта резанию от скорости при углах резания от 20 до 60°

Для эффективного использования имеющейся мощности при постоянной производительности по приведенным зависимостям может быть определен рациональный баланс между толщиной срезаемой стружки и скоростью резания. На рис. 6 представлены изолинии удельной энергоемкости процесса резания при постоянной производительности в зависимости от скорости для грунтов с I по IV категорию.



Рис. 6. Зависимость удельной энергоемкости процесса резания при постоянной производительности от скорости резания

Как видно из рис. 6, удельная энергоемкость имеет точки минимума. Для песчаных грунтов I категории энергоемкость минимальна при скорости резания 1,4 м/с (1,1 ÷ 1,6), для супесчаных II категории – 1,7 м/с (1,6 ÷ 1,9), для суглинистых III категории – 2,5 м/с (2,4 ÷ 2,6), для глинистых IV категории – 3,9 м/с (3,4 ÷ 4,4). Следует отметить, что при определении рациональной скорости движения рабочего органа для конкретных видов землеройных машин процесс копания необходимо рассмотреть как систему «грунт – рабочий орган», учитывающую конструктивные и технологические особенности машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 357 с.

2. Зеленин, А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н. Зеленин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.

3. Артемьев, К.А. Основы теории копания грунта скреперами / К.А. Артемьев. – М. : Машиностроение, 1963.

4. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел. Том 2 / А. Надаи ; пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. – М. : Мир, 1969. – 864 с.

5. Иванов, Н.Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Н.Н. Иванов, Я.И. Калужский, М.Б. Корсунский [и др.]. – М. : Транспорт, 1973. – 328 с.

6. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Том 6. Гидродинамика / Л.Д Ландау, Е.М. Лифшиц. – 3-е изд., перераб. – М. : Наука. Гл. ред. физ.мат. лит., 1986. – 736 с.

7. Станевский, В.П. О физической сущности влияния скорости на силу резания грунтов // Горные, строительные и дорожные машины : сборник. Вып. 4 / В.П. Станевский. – Киев. : Техника, 1966. С. 46-51.

8. Фомичев, В.П. Методика расчета оптимальных режимов работы траншейных экскаваторов / В.П. Фомичев. – Ростов н/Д : РИСИ, 1971. – 118 с.

9. Алексеева, Т.В. Дорожные машины. Часть 1. Машины для земляных работ / Т.В. Алексеева, К.А. Артемьев, А.А. Бромберг [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 504 с.

ABOUT INFLUENCE OF SPEED WORKING BODIES OF DIGGING MACHINES ON THE RESISTANCE FORCE OF SOIL CUTTING

Abstract. The processes occurring during high-speed cutting of soil is are considered. The dependence of the resistance force of soil cutting from speed of interaction, taking into account the compressibility of soil and the occurrence of wave drag forces is established. Analytical expressions for calculating the components of the total force of high-speed cutting of soils is given. The dependence of the energy intensity of the cutting process of the speed is analyzed and practical recommendations for the rational choice of cutting speed is given.

Keywords: resistance force of soil cutting, cutting speed, compressibility of soil, compression wave ground, the force of the wave resistance, the power consumption of the cutting process, efficient cutting speed.

REFERENCES

1. Vetrov Yu.A. Rezanie gruntov zemleroynyimi mashinami / Yu.A. Vetrov. –M.: Mashinostroenie, 1971. – 357 s.

2. Zelenin A.N. Osnovyi razrusheniya gruntov mehanicheskimi sposobami / A.N. Zelenin. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 376 s.

3. Artemev K.A. Osnovyi teorii kopaniya grunta skreperami / K.A. Artemev. – M.: Mashinostroenie, 1963.

4. Nadai A. Plastichnost i razrushenie tverdyih tel. Tom 2 / A. Nadai ; per. s angl. pod red. G.S. Shapiro. – M.: Mir, 1969. – 864 s.

5. Ivanov N.N. Konstruirovanie i raschet nezhestkih dorozhnyih odezhd / N.N. Ivanov, Ya.I. Kaluzhskiy, M.B. Korsunskiy [i dr.]. – M.: Transport, 1973. – 328 s.

6. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika. Tom 6. Gidrodinamika / L.D Landau, E.M. Lifshits. – 3-e izd., pererab. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. – 736 s.

7. Stanevskiy V.P. O fizicheskoy suschnosti vliyaniya skorosti na silu rezaniya gruntov // Gornyie, stroitelnyie i dorozhnyie mashinyi :

sbornik. Vyip. 4 / V.P. Stanevskiy. – Kiev.: Tehnika, 1966. S. 46-51.

8. Fomichev V.P. Metodika rascheta optimalnyih rezhimov rabotyi transheynyih ekskavatorov / V.P. Fomichev. – Rostov-na-Donu.: RISI, 1971. – 118 s.

9. Alekseeva T.V. Dorozhnyie mashinyi. Chast 1. Mashinyi dlya zemlyanyih rabot / T.V. Alekseeva, K.A. Artemev, A.A. Bromberg [i dr.]. – 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 504 s.

Семкин Дмитрий Сергеевич (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» ФГБОУ ВО «СибАДИ». (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира 5, е-таіl: D.S.Semkin@yandex.ru).

Semkin Dmitry Sergeevich (Russia, Omsk) – candidate of technical Sciences, docent of the department «Technique for construction and service of oil and gas complexes and infrastructures», «The Siberian Automobile and Highway University (SibADI)». (644080, Russia, Omsk, Mira prospect 5, e-mail: D.S.Semkin@yandex.ru).

УДК 539-531

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МАКСИМАЛЬНЫХ СИЛ И УСКОРЕНИЙ ПРИ УДАРЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Б.Н.Стихановский¹, Л.М.Стихановская² ¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Россия, г. Омск; ²ФБГОУ ВО «СибАДИ» Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье рассматривается проблема определения максимальных сил при ударном взаимодействии твердых тел в случае упругих, пластических деформаций контакт-