

УДК 621.879

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ И ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

*В.Н. Кузнецова, И.С. Кузнецов
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В качестве объекта исследования рассмотрен процесс разработки мерзлых грунтов рабочими органами землеройных и землеройно-транспортных машин. Представлены основные аспекты разработанной математической модели и оригинальной методики исследования процессов пространственного взаимодействия рабочих органов землеройных машин с мерзлым грунтом, позволяющие получить эпюры распределения напряжений по поверхности рабочего органа плоской формы. Обоснован и доказан нелинейный характер распределения напряжений на контактной поверхности рабочего органа при взаимодействии с грунтом.

Материалы и методы. Приведены описание и анализ результатов экспериментальных исследований по количественному определению коэффициентов, входящих в математическую модель, и установления границ ее адекватности. Установлены зависимости для определения экспериментальных коэффициентов аналитически.

Результаты. Проведены исследования и анализ их результатов для установления аппроксимирующей зависимости между величиной силы разработки мерзлого грунта и пятном контакта на алюминиевой пластине. Для каждого значения абсциссы (координаты центра тяжести алюминиевой пластины) количественно определены значения суммарной нормальной силы. Показана хорошая сходимость теоретически полученных зависимостей с результатами эксперимента.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования являются основой для методологии обоснования и определения оптимальных параметров рабочих органов землеройных машин повышенной эффективности путем снижения энергоемкости процесса разработки мерзлого грунта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рабочий орган, землеройная машина, землеройно-транспортная машина, мерзлый грунт, давление, прочность, напряжение, эпюра.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение северных, арктических, дальневосточных регионов является на сегодняшний день одним из приоритетных направлений Российской Федерации. Актуальны задачи разработки и освоения месторождений нефти и газа, горнодобывающих и шельфовых проектов, развития транспортной системы и инфраструктуры. Россия, преобладающая часть территории которой занята вечномёрзлыми грунтами либо грунтами сезонного промерзания [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], сталкивается с целым рядом проблем при разработке таких грунтов. Необходимо учитывать и тот факт, что земляные работы производятся не только в летнее, но и в зимнее время ввиду смещения сроков строительства или высокой заболоченности местности. Поэтому вопрос разработки

мерзлых и сезонно-промерзающих грунтов является актуальным. Возможность высокоэффективного круглогодичного производства земляных работ существенно увеличит производительность машин и снизит их простои, приведет к сокращению сроков ввода объектов строительства в эксплуатацию, ликвидирует сезонность в различных отраслях строительства, улучшит экономические показатели производственных объектов.

ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В процессе разработки мерзлого грунта механическими рабочими органами происходит отделение его от массива и разрыхление до степени, обеспечивающей возможность дальнейшего транспортирования или экскавации.

Разработка мерзлых грунтов связана с множеством факторов, воздействующих на процесс их взаимодействия с рабочими органами землеройных и землеройно-транспортных машин [10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23].

Сопротивляемость мёрзлых грунтов разрушению различными способами определяется такими параметрами, как плотность, влажность, температура, льдистость, механическая прочность, внешняя нагрузка, прочность смерзания, минерализация, а также упругими, электрическими, теплофизическими, терморелогическими и другими параметрами грунтов [24,25,26]. Известно, что некоторые разновидности пластично-мерзлых грунтов при определенных условиях обладают сжимаемостью, характеризующейся уплотнением без возмож-

ного расширения и вызываемой сжимающей нагрузкой. Сжимаемость мерзлых грунтов зависит от его влажности, температуры, величины и продолжительности действия нагрузки [24].

Согласно расчетной схеме (рисунок 1) уравнение движения мерзлого грунта при воздействии на него плоской контактной поверхности рабочего органа в плоскости XOY имеет вид [27, 28]:

$$\rho \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \vartheta \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

где ρ , ϑ , p – соответственно плотность, скорость и давление грунта; t – время.

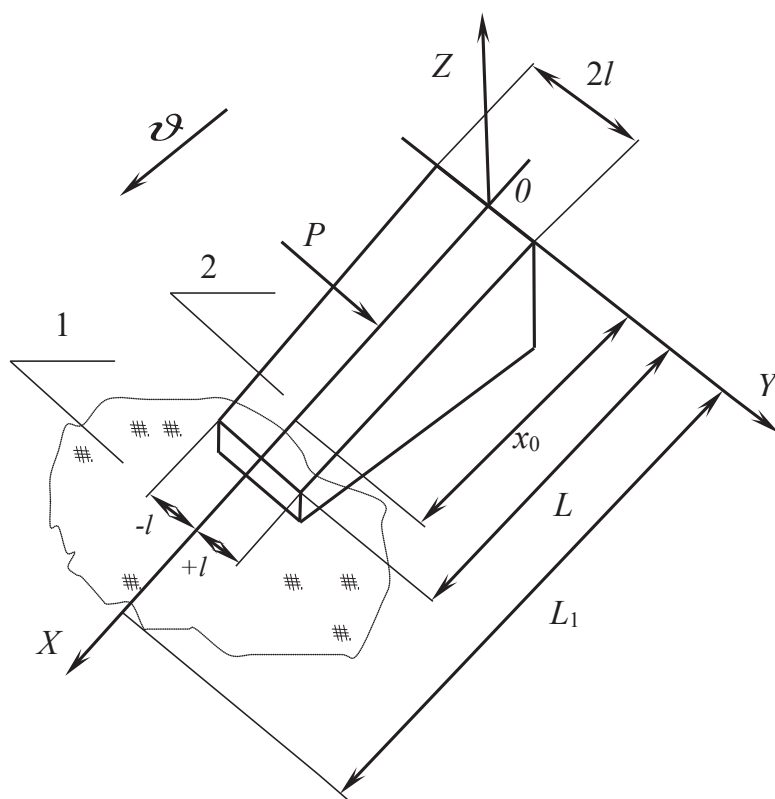


Рисунок 1 – Расчетная схема взаимодействия плоской контактной поверхности рабочего органа с мерзлым грунтом:

1 – грунт; 2 – рабочий орган
Figure 1 – The design scheme of the flat contact surface interaction of the working body with frozen soil
1 - ground; 2 - working element

Уравнение (1) описывает закон сохранения импульса и включает в себя два уравнения: одномерного движения и неразрывности пластически сжимаемой среды.

Нормальная составляющая силы сопротивления мерзлого грунта разработке определяется как поверхностный интеграл

$$N = \iint_{\sigma} p_0 P(x)Q(y) d\sigma, \quad (2)$$

где σ – площадь контактной поверхности рабочего органа; p_0 – величина нормального давления, действующего на элементарную площадку лобовой поверхности рабочего органа; $P(x)$, $Q(y)$ – характеристические нормированные функции, описывающие закономерности распределения давления по поверхности рабочего органа в плоскостях XOZ и YOZ .

Значение p_0 изменяется по поверхности рабочего органа в зависимости от физико-механических свойств разрабатываемого грунта и режимов разработки от минимального значения p_0^{\min} до величины, численно равной максимальному значению сопротивления грунтов сжатию $[\sigma_{сж}]$:

$$p_0^{\min} \leq p_0 \leq [\sigma_{сж}]. \quad (3)$$

При контакте рабочего органа землеройной машины с мерзлым грунтом возникает сжатый клин грунта, в котором увеличивается его плотность. Процесс распространения дефор-

маций в грунте является следствием не только ударных нагрузок, но и увеличения скорости движения рабочих органов землеройных машин, и чередования сколов грунта [29]. В этом случае скорость частиц грунта, движущихся по оси OX , зависит только от времени, поэтому

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Аналитически была получена зависимость распределения давления, действующего на поверхность рабочего органа по его ширине в плоскости YOZ [27]:

$$Q(y) = \frac{1+ay^2}{(1+\frac{a}{a+2}y^2)^2}, \quad (4)$$

где a – коэффициент, определяемый из начальных условий.

Из графика функции $Q(y)$ (рисунок 2) видно, что боковые грани рабочего органа являются концентраторами напряжений, поэтому именно здесь наблюдается максимальное значение функции $Q(y)$. Следует отметить, что глобальный максимум функции $Q(y)$ вдоль оси X находится в плоскости, расположенной выше режущей кромки рабочего органа. В данной плоскости происходит сдвиг элементов стружки грунта, тогда как нижняя часть рабочего органа продолжает вдавливаться в грунт [30].

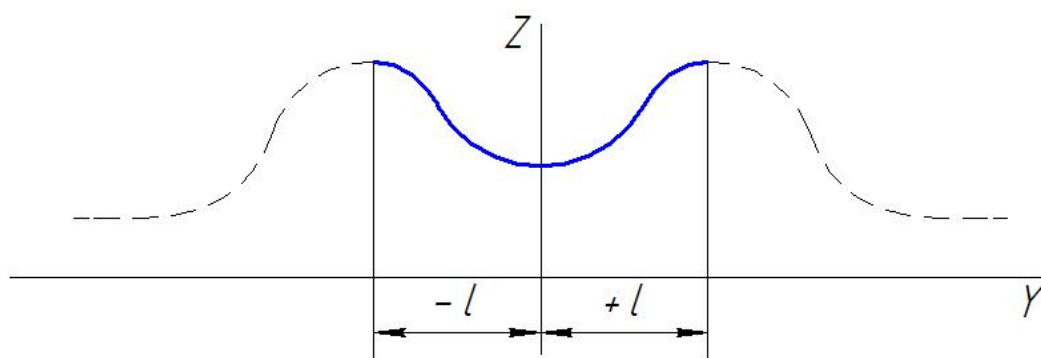


Рисунок 2 – Вид функции $Q(y)$ l – половина ширины рабочего органа
Figure 2 – Function form of the $Q(y)$ l – the width's half of the working body

Для корректного выбора функции распределения давления по поверхности рабочего органа в плоскости XOZ необходимо отметить, что многие исследователи, в том числе В. В. Соколовский [31], отмечают линейный характер распределения напряжений на опорной стенке (на рабочем органе) по высоте

$$P(x) = 1 + kx \cdot \gamma, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от углов внутреннего трения и резания; γ – объемная сила тяжести грунта, kH/m^3 .

Однако анализ схемы воздействия на грунт рабочего органа и результаты экспериментальных исследований, приведенные ниже, дают основание утверждать, что характер изменения функции $P(x)$ имеет нелинейный характер (рисунок 3) и подчиняется зависимости

$$P(x) = \left[1 + 2 a_2 \cdot a_3 \cdot x \cdot e^{-a_3 x^2} \right], \quad (7)$$

где a_2, a_3 – коэффициенты пропорциональности, зависящие от физико-механических свойств разрабатываемого мерзлого грунта и режимов рыхления.

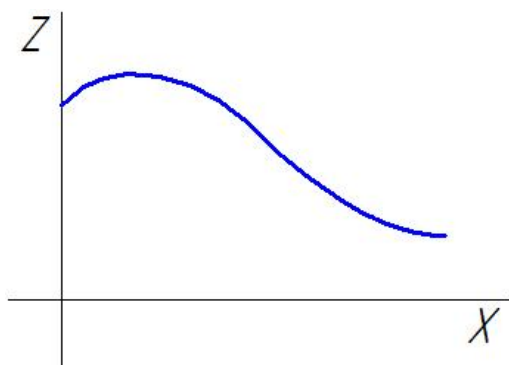


Рисунок 3 – Вид функции $P(x)$
Figure 3 – Function form of the $P(x)$

В этом случае закономерность распределения давления по поверхности рабочего органа можно представить как

$$P(x, y) = P^*(x) \cdot Q(y) = \frac{P(x)}{P^{\max}(x)} \cdot Q(y) \quad (8)$$

Тогда зависимость (2) преобразуется в следующий вид:

$$N = \iint_F P(x, y) dx dy =$$

$$= \frac{1}{P^{\max}(x)} \iint_F P(x) \cdot Q(y) dx dy, \quad (8)$$

где F – площадь контактной поверхности рабочего органа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Величина силы в зоне контакта рабочего органа с мерзлым грунтом достигает своего максимального значения в момент, непосредственно предшествующий отделению грунта от массива, и зависит от глубины разработки грунта и эпюры распределения нагрузок на контактной поверхности рабочего органа. Закономерность распределения нагрузки по контактной поверхности рабочего органа землеройной машины, предложенная А.Н. Зелениным [30], не имеет достаточно полных ни теоретических, ни экспериментальных доказательств. Следовательно, возникает необходимость в установлении эпюры распределения нагрузок. Данные исследования проведены на экспериментальной установке (рисунок 4). Кроме этого, в результате проведенного эксперимента были определены значения коэффициентов, входящих в представленную выше математическую модель, и подтверждена адекватность теоретических исследований взаимодействия рабочего органа с разрабатываемым мерзлым грунтом.

На подвижной тележке установки (рисунок 4) закрепляется экспериментальная модель рабочего органа (модель зуба) с возможностью изменения угла резания. Модель представляет собой металлическую конструкцию, в которой по всей длине режущей кромки выфрезерованы 5 канавок размером 20×20 мм. В каждой канавке высверлено по четыре отверстия, в которые приклеены на эпоксидный клей металлические шарики диаметром 5 мм таким образом, чтобы все они находились на одном уровне. В канавки модели зуба помещаются сменные элементы (алюминиевые пластины), которые при проведении экспери-



Рисунок 4 – Экспериментальная установка с моделью рабочего органа
Fig. 4 – Experimental installation with working body model

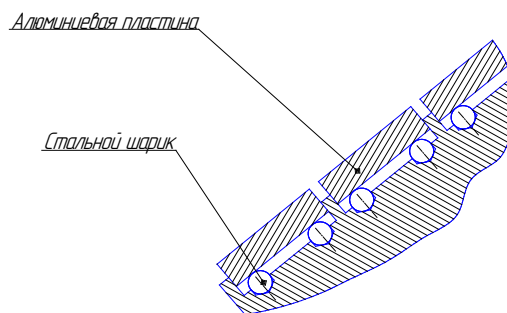


Рисунок 5 – Экспериментальные пластины с шариками
Fig. 5 – Experimental plates with balls

мента, с одной стороны, опираются на четыре шарика, а с другой – на грунт. Таким образом, пластины являются индикаторами сил воздействия грунта на рабочий орган (рисунок 5). В качестве модели мерзлого грунта использовался предварительно замороженный грунт, находящийся в специально изготовленной сварной металлической конструкции.

Схема внедрения экспериментального зуба приведена на рисунке 6. Если рассматривать изменение значения функции $Q(y)$ вдоль оси X , то следует отметить, что ее глобальный максимум находится в плоскости, расположенной выше режущей кромки рабочего органа (рисунок 6). В данной плоскости происходит сдвиг элементов стружки грунта, тогда как нижняя часть рабочего органа продолжает вдавливаться в грунт.

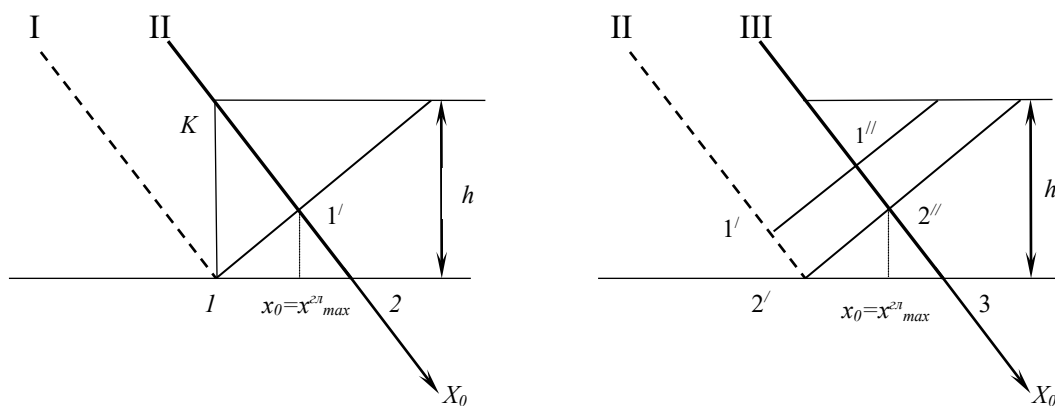


Рисунок 6 – Схема воздействия на мерзлый грунт экспериментального зуба
Fig. 6 – Diagram of the experimental tooth's effect on the frozen soil

Рабочий орган из положения I перемещается в положение II. За это время происходит скол грунта по линии 1 – 1'. За этот период грунт в объеме 1K2 будет сжат и его частицы переместятся в направлении нормали к рабочей грани рабочего органа. Перейдя из положения 1 в положение 1', частица грунта прошла наибольший путь. Следовательно, напряжение сжатия в точке 1' будет наибольшим, и плоскость разрушения пройдет через эту точку.

Далее, продвинувшись из положения II в положение III, на расстояние 2 – 3, рабочий орган переместит все частицы грунта на расстояние 1' – 1''. Скол произойдет по линии разрушения 2 – 2', так как точка 2' наиболее удалена от дневной поверхности и в ней будет наблюдаться наибольшее давление. Следовательно, в точках 1' и 2' с координатами $x = x_0 = x^{2l}_{max}$, $y = \pm l$ будет находиться глобальный максимум распределения давлений по длине рабочего органа рыхлителя, при

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

котором значение величины нормального давления, действующее на лобовую поверхность рабочего органа и определяемое по формуле (8), максимально.

При передвижении подвижной тележки экспериментальный зуб внедрялся в грунт и шарики вдавливались в алюминиевые пластины, оставляя на последних отпечатки определенного диаметра. По пятну контакта на алюминиевой пластине от шариков необходимо было определить величину силы, возникающей при рыхлении мерзлого грунта по всей длине рабочей поверхности экспериментального зуба. Для этого были замерены диаметры отпечатков шариков на пластинах. Результаты замеров показаны в таблица 1.

Таблица 1
ДИАМЕТРЫ ОТПЕЧАТКОВ НА ПЛАСТИНАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗУБА
Table 1
DIAMETERS OF PRINTS ON THE EXPERIMENTAL TOOTH'S PLATES

Номер пластины	1	2	3	4	5
Диаметр отпечатка d, мм	0,8	1	2	2	1,25

Проведены исследования для получения аппроксимирующей зависимости между величиной силы рыхления мерзлого грунта и пятном контакта на алюминиевой пластине при помощи лабораторного комплекса ЛКСМ-1К (таблица 2).

Замер диаметров проводился по следующей методике.

Экспериментальные шарики вдавливались в алюминиевые пластины под действием заранее известной величины силы Q_3 , создаваемой вертикальным перемещением траверсы лабораторного комплекса. После этого определялись диаметры отпечатков пятен контактов шариков с пластинами (таблица 2). На одном отпечатке определялись два взаимно перпендикулярных диаметра, обозначенные в таблице 2 соответственно d_1 и d_2 .

Таблица 2
ДИАМЕТРЫ ОТПЕЧАТКОВ НА ПЛАСТИНАХ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ЛАБОРАТОРНОМ КОМПЛЕКСЕ
Table 2
DIAMETERS OF PRINTS ON PLATES OBTAINED ON A LABORATORY COMPLEX

Создаваемая сила внедрения Q_3 , Н	Диаметр отпечатка, мм	
	d_1	d_2
150	0,52	0,53
	0,61	0,58
	0,55	0,52
200	0,63	0,68
	0,64	0,71
	0,67	0,63
300	0,93	0,98
	1,05	1,05
	0,97	0,96
500	1,28	1,25
	1,32	1,31
	1,27	1,29
	1,31	1,27
700	1,52	1,49
	1,48	1,45
	1,53	1,54
	1,49	1,51
1000	1,85	1,83
	1,84	1,82
	1,89	1,88
	1,85	1,84

Таблица 3
ЗНАЧЕНИЯ СУММАРНОЙ НОРМАЛЬНОЙ СИЛЫ ПО ДЛИНЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ОРГАНА
Table 3
VALUES OF THE TOTAL NORMAL FORCE ALONG THE EXPERIMENTAL MODEL LENGTH OF THE WORKING BODY

X, м	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
N, Н	764	1 978	6 733	11 508	133 743

Пластина помещалась на покровное стекло микроскопа. При проведении исследований использовался окулярный вкладыш с нанесённой на него шкалой, который вставляется в окуляр между линзами. Такой окуляр получил название окуляром-микрометром. Расстояние между делениями шкалы окуляра-микрометра равнялось 0,1 мм. Поскольку окуляры применялись в комбинации с различными объективами, для каждого увеличения цена деления окуляра-микрометра определялась отдельно с помощью объекта-микрометра. Последний представляет собой металлическую пластину со шкалой. На ней нанесено 100 делений. Расстояние между соседними делениями равно 0,01 мм, а общая длина шкалы 1 мм. Объект-микрометр служит для определения увеличения микроскопа и выполнения абсолютных измерений с окулярами.

В результате обработки данных эксперимента и замеров была получена регрессионная зависимость величины силы Q_3 от диаметра отпечатка экспериментального шарика:

$$Q_3 = b_1 d^2, \quad (10)$$

где b_1 – коэффициент пропорциональности ($b_1 = 298,45$); d – диаметр отпечатка шарика.

Коэффициент b_1 пропорционален удельному сопротивлению, оказываемому пластиной при внедрении экспериментального шарика. Величина b_1 является постоянной.

Для каждого значения абсциссы X (координаты центра тяжести пластины) экспериментально определены значения суммарной нормальной силы, действующей на рабочий орган (таблица 3).

Максимальное значение давления грунта на рабочем органе рыхлителя [27]:

$$p_{\max} = a_1 \left[1 + 2 a_2 a_3 \sqrt{\frac{1}{2a_3}} e^{0,5} \right] \frac{1(a+2)^2}{4(a+1)}. \quad (11)$$

Из графика зависимости $p_{\max} = f(a)$ определяются значение коэффициента $a = 1$ для мерзлого песка, для которого предел прочности на сжатие $[\sigma_{\text{сж}}]$ равен 10 МПа.

Соответствующие найденному значению

коэффициента $a = 1$ величины остальных коэффициентов составят: $a_1 = 1,58 \cdot 10^5$ Па, $a_2 = 63,56$, $a_3 = 1,01$.

Анализ полученной зависимости показывает, что горизонтальная составляющая сопротивления рыхлению P_p прямо пропорциональна глубине рыхления h . Это согласуется с исследованиями проф. А.Н. Зеленина [13].

$$P_p = a_1 \cdot [1 + a_2 (1 - e^{-a_3})] \cdot \frac{h}{\sin \alpha} \cdot l \cdot k_y \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) = \\ = a_1 \cdot [1 + a_2 (1 - e^{-a_3})] \cdot h \cdot l \cdot k_y \cdot (1 + \operatorname{ctg} \alpha). \quad (12)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из представленных выше зависимостей и с учетом экспериментально полученных значений коэффициентов, входящих в математическую модель, графически были установлены пространственные эпюры распределения напряжений по поверхности рабочих органов землеройных машин при их взаимодействии с мерзлым грунтом.

Анализ эпюр показывает, что наибольшие напряжения наблюдаются в зонах глобального максимума, расположенных симметрично относительно продольной плоскости рабочего органа. Эти зоны находятся выше режущей кромки рабочего органа по длине и смещены к крайним точкам профиля лобовой поверхности. Координаты нахождения зон глобального максимума зависят от физико-механических свойств разрабатываемого грунта, условий его разрушения, параметров рабочего органа. Полученная аналитически эпюра распределения напряжений по длине рабочего органа согласуется с регрессионной зависимостью, установленной по результатам эксперимента; погрешность составляет 6 – 8 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов: научное издание. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
2. Baker D. G., Ruschy D. L. Calculated and Measured Air and Soil Freeze-Thaw Frequencies // American Meteorological Society. 1995. V. 34, no. 10. P. 2197-2205.

3. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC Press, 2007. 448 p.
4. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: общая и прикладная: учебное пособие. М.: Строительство, 2013. 448 с.
5. Ершов Э.Д. Лабораторные методы исследования мерзлых пород. М.: Изд-во МГУ, 1985. 146 с.
6. Zhu Y. Constitutive Relations of Frozen Soil in Uniaxial Compression // Journal of Glaciology and Geocryology. 1992. №3. P. 216-220.
7. Роман Л.Д. Механика мерзлых грунтов. М.: Наука-Интерпериодика, 2002. 426 с.
8. Li Q. Development of Frozen Soil Model // Advances in Earth Science. 2006. № 12. P. 96 – 103.
9. Sun X. АСТ—timely experimental study on meso-scopic structural damage development of frozen soil under triaxial shearing // Rock and Soil Mechanics. 2005. № 8. P. 150 – 163.
10. Баловнев В.И. Моделирование и прогнозирование процессов взаимодействия машин с многофазными средами: взаимодействие рабочих органов строительных, дорожных и коммунальных машин с грунтом и другими материалами. М.: МАДИ, 2000. 61 с.
11. Баловнев В.И., Нгуен З.Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. № 3. С. 38–40.
12. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение, 1971. 357 с.
13. Желудкевич Р.Б. Разработка мерзлых грунтов землеройными машинами с дисковым инструментом. – Красноярск: СФУ, 2012. 194 с.
14. Дьяков И.Ф., Ивкин В.С., Жукова Д.В. Некоторые теоретические основы разрушения грунта газоимпульсным рыхлителем // Вестник СГТУ. 2013. Том 2. № 2с (71). С. 242 – 245.
15. Talalay P. G. Subglacial till and bedrock drilling // Cold Regions Science and Technology. 2013 – Vol. 86. P. 142-166.
16. Лещинер В. Б. Совершенствование инструмента для резания мерзлых грунтов. Томск: Изд-во Томского университета, 1991. 210 с.
17. Евдокимов А.Н., Васильев С.И., Жубрин В.Г. Аналитическое определение силы сопротивления внедрению инструмента в мерзлый грунт // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 11. С. 115 – 118.
18. Завьялов А.М., Завьялов М.А., Кузнецова В.Н. Взаимодействие дорожных и строительных машин с контактной средой: монография. Омск: КАН, 2011. 370 с.
19. Мартюченко И.Г. Машины и оборудование для разработки и бурения мерзлых грунтов [Электронный ресурс]: учебное пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 101 с.
20. Растегаев И.К. Механика и теплофизика статистического рыхления вечномерзлых грунтов. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1988. 222 с.
21. Волков Д.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
22. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421 – 428.
23. Ryabets N., Kirzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115 – 128.
24. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 1973. 194 с.
25. Васильев С.И. Вероятностные физико-механические характеристики грунтов Восточно-Сибирского региона // Транспортное строительство. 2013. № 3 (19). С. 28–30.
26. Недорезов И.А. Вариации прочности грунтов, разрабатываемых в строительстве // Транспортное строительство. № 8. 2013. С. 29 – 30.
27. Кузнецова В.Н. Развитие научных основ взаимодействия контактной поверхности рабочих органов землеройных машин с мерзлыми грунтами: дис... д-ра техн. наук. Омск, 2009. 259 с.
28. Завьялов А.М., Завьялов М.А., Кузнецова В.Н., Мещеряков В.А. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели: монография – Омск : СибАДИ, 2012. 411 с.
29. Рахматуллин Х.А., Сагомоян А.Я., Алексеев Н.А. Вопросы динамики грунтов. М.: МГУ, 1964. 124 с.
30. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 420 с.
31. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Физматгиз, 1960. 214 с.

SIMULATION OF THE CONTACT PROCESS INTERACTIONS OF LAND-MOVING AND EARTH-TRANSPORT MACHINES' WORKING BODIES WITH FROZEN SOIL

V.N. Kuznetsova, I.S. Kuznetsov

ABSTRACT

Introduction. The process of developing frozen soils is considered by the working equipment of earth-moving and earth-moving machinery as a research object. The main aspects of the developed mathematical model and the original method for studying the processes of spatial interaction of the excavating machines' working bodies with frozen soil are presented. Moreover, such aspects allow to obtain the stress distribution diagrams over the surface of the working body. The nonlinear character of the stresses' distribution on the contact surface of the working body during the interaction with the soil has been substantiated and proved.

Materials and methods. The description and analysis of the experimental results on the coefficients' quantitative determination, which enter into the mathematical model, and also the boundaries' establishment of their adequacy are given. The dependencies have been established to determine the experimental coefficients analytically.

Results. The investigations and analysis of the results have been carried out to establish an approximating interrelation between the strength of the frozen soil development and the contact spot on the aluminum plate. Therefore, each abscissa value (the gravity center coordinates of the aluminum plate) and the values of the total normal force are quantified. As a result, good convergence of theoretically obtained dependences with experimental results is shown.

Discussion and conclusion. The carried out researches are the basis for the justifying and determining methodology for the working equipment's optimal parameters of earth-moving machines with increased efficiency by reducing the energy intensity of the developing frozen soils' process.

KEYWORDS: working equipment, earthmoving machine, earthmoving-transport machine, frozen soil, pressure, strength, stress, diagram.

REFERENCES

1. Vyalov S.S. *Reologiya merzlykh gruntov* [Rheology of frozen soils]. Moscow, Stroiizdat, 2000. 464 p.
2. Baker D. G., Ruschy D. L. Calculated and Measured Air and Soil Freeze-Thaw Frequencies. *American Meteorological Society*, 1995, v 34. no. 10, pp. 2197-2205.
3. Atkinson J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC Press, 2007. 448 p.
4. Tsytoich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov: obshchaya i prikladnaya* [Mechanics of frozen soils: general and applied]. Moscow, Building, 2013. 448 p.
5. Ershov E.D. *Laboratornye metody issledovaniya merzlykh porod* [Laboratory methods for studying frozen rocks]. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1985. 146 p.
6. Zhu Y. Constitutive Relations of Frozen Soil in Uniaxial Compression. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, no. 3, pp. 216-220.
7. Roman L.D. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Nauka-Interperiodica, 2002. 426 p.
8. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*, 2006, no. 12, pp. 96-103.
9. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic structural damage development of frozen soil under triaxial shear. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, no. 8, pp. 150-163.
10. Balovnev V.I. *Modelirovanie i prognozirovanie processov vzaimodeystviya mashin s mnogofaznymi sredami: vzaimodeystvie rabochih organov stroitel'nykh, dorozhnykh i kommunal'nykh mashin s gruntom i drugimi materialami* [Modeling and forecasting of processes of interaction of machines with multiphase media: interaction of working bodies of construction, road and municipal machines with soil and other materials]. Moscow, MADI, 2000. 61 p.
11. Balovnev V.I., Nguyen Z. Sh. *Opreделение soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti* [Determination of resistance in the development of soils by a ripper with an integral index of strength]. *Construction and road machines*, 2005, no. 3, pp. 38-40.
12. Winds Yu. A. *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami* [Soil cutting with digging machines]. Moscow, *Mechanical Engineering*, 1971. 357 p.
13. Zhelukevich R. B. *Razrabotka merzlykh gruntov zemlerojnymi mashinami s diskovym instrumentom* [Development of frozen soils with digging machines with a disk tool]. Krasnoyarsk, SFU, 2012. 194 p.
14. D'yakov I.F., Ivkin V.S., Zhukova D.V. *Nekotorye teoreticheskie osnovy razrusheniya grunta gazoimpul'snym ryhlitelem* [Some theoretical bases of soil destruction by a gas-impulse ripper]. *Vestnik SSTU*, 2013, Volume 2, no. 2c (71), pp. 242-245.
15. Talalay P. G. Subglacial till and bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, vol 86, pp. 142-166.
16. Leschiner V.B. *Sovershenstvovanie instrumenta dlya rezaniya merzlykh gruntov* [Perfection of a tool for cutting frozen soils]. Tomsk, Publishing house of Tomsk University, 1991. 210 p.
17. Evdokimov A.N., Vasilyev S.I., Zhubrin V.G. *Analiticheskoe opredelenie sily soprotivleniya vnedreniyu instrumenta v merzlyy grunt* [Analytical definition of the force of resistance to the introduction of tools into the frozen ground]. *Sistemy. Methods. Technologies*, 2011, no. 11, pp. 115-118.
18. Zavyalov A.M., Zavyalov M.A., Kuznetsova V.N. *Vzaimodeystvie dorozhnykh i stroitel'nykh mashin s kontaktnoy sredoy* [Interaction of road and construction machines with a contact medium]. Omsk, CAS, 2011. 370 p.
19. Martyuchenko I.G. *Mashiny i oborudovanie dlya razrabotki i bureniya merzlykh gruntov* [Machines and equipment for the development and drilling of frozen soils]. Saratov, Sarat. state. tech. University, 2009. 101 p.
20. Rastegaev I.K. *Mekhanika i teplofizika statisticheskogo ryhleniya vechnomerzlykh gruntov* [Mechanics and Thermophysics of Statistical Loosening of Permafrost Soils]. Krasnoyarsk, Publishing House of the Krasnoyarsk University, 1988. 222 p.
21. Volkov D.P. *Mashiny dlya zemlyanykh rabot* [Machines for excavation]. Moscow, Mechanical Engineering, 1992. 448 p.
22. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of the wing fracture of the frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, vol. 65, pp. 421-428.
23. Ryabets N., Kirzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, vol. 36, pp. 115-128.
24. *Rukovodstvo po opredeleniyu fizicheskikh, teplofizicheskikh i mekhanicheskikh harakteristik merzlykh gruntov* [Manual on the determination of physical, thermophysical and mechanical characteristics of frozen soils]. Moscow, Stroiizdat, 1973. 194 p.
25. Vasiliev S.I. *Veroyatnostnye fiziko-mekhanicheskie harakteristiki gruntov Vostochno-Sibirskogo regiona* [Probabilistic physical and mechanical characteristics of soils of the East Siberian region]. *Transport construction*, 2013, no. 3 (19), pp. 28-30.
26. Nedorezov I.A. *Variacii prochnosti gruntov, razrabatyvaemykh v stroitel'stve* [Variations in the strength of soils developed in construction]. *Transport construction*, 2013, no. 8, pp. 29-30.
27. Kuznetsova V.N. *Razvitie nauchnykh osnov vzaimodeystviya kontaktnoy poverhnosti rabochih organov zemlerojnykh mashin s merzlymi gruntami* [Development of scientific bases of interaction of a contact surface of working bodies of digging machines with frozen soils]. dis. Dr. tehn. sciences. Omsk, 2009. 259 p.
28. Zavyalov A.M., Zavyalov M.A., Kuznetsova V.N., Meshcheryakov V.A. *Matematicheskoe modelirovanie rabochih processov dorozhnykh i stroitel'nykh mashin: imitacionnye i adaptivnye modeli* [Mathematical modeling of working processes of road and building machines: simulation and adaptive models]. Omsk, SibADI, 2012. 411 p.
29. Rakhmatullin H.A., Sagomonyan A.Ya., Alekseev N.A. *Voprosy dinamiki gruntov* [Questions of the dynamics of soils]. Moscow, Moscow State University, 1964. 124 p.

