

05.11.13

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЫХЛЕНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДОВОГО И МЕРЗЛОГО ГРУНТА РЫХЛИТЕЛЕМ С УШИРИТЕЛЕМ

Р.Б. Желукевич¹, Ю.Ф. Кайзер¹, В.Г. Шрам¹, А.В. Лысянников¹, В.Л. Тюканов¹, А.В. Егоров²

¹Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа, г. Красноярск

²Поволжский государственный технологический университет, Институт механики и машиностроения, г. Йошкар-Ола

При обустройстве нефтяных и газовых месторождений основной технологической операцией в зимний период является рыхление снежно-ледового и мерзлого грунта. Определение усилий на трехгранном клине имеет не только научное, но и большое практическое значение, так как позволит более обоснованно выполнять прочностные расчеты рабочих органов многих землеройных машин. Для определения действия сил на трехгранном усеченном параллельно основанию клине при установившемся движении использованы следующие допущения: клин острый, трение нижней грани о грунт отсутствует. Научная новизна представлена разработанными теоретическими положениями при формировании и реализации новых технических решений. Разработаны математические модели процесса взаимодействия дискового инструмента с твердыми средами. Получены аналитические зависимости усилия резания от вида среза и свойств среды, учитывающие основные геометрические параметры такого инструмента. В процессе рыхления установка уширителя на стойку рыхлителя увеличивает в нижней части борозды ширину захвата, позволяет приблизить режущие кромки косых клиньев и дисковых резцов к основанию борозды и обеспечить внедрение их в боковые стенки, исключив уплотнение грунта за счет его смятия и осуществив отрыв грунта от массива под углом скола 35–40°. При этом на прочных грунтах режущая кромка наконечника стойки рыхлителя выталкивается из борозды и снижает тягу трактора, а режущие кромки косых клиньев и дисковых резцов затягивают стойку рыхлителя в грунт, увеличивая его тягу, поэтому установка уширителя способствует улучшению тяговых показателей агрегата.

Ключевые слова: математическая модель, рыхление, мерзлый грунт, рыхлитель, уширитель.

ВВЕДЕНИЕ

Районы Восточной Сибири и Севера, где находятся значительные запасы нефти и газа, отличаются достаточно продолжительным периодом низких температур, в результате которых происходит неизбежное образование снежно-ледовых и мерзлых грунтов.

При обустройстве месторождений нефти и газа важнейшим технологическим процессом является разработка, а в частности рыхление снежно-ледового и мерзлого грунта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рыхление снежно-ледовых и мерзлых грунтов рыхлителем с уширителем можно разделить на три основные зоны разрушения, куда входят:

- зона наконечника P_n ;
- зона косых клиньев $P_{кх}$;
- зона дисковых резцов $P_{др}$.

а) Зона наконечника P_n .

Составляющие силы сопротивления рыхлению соответственно на передней грани – P_n , в боковых прорезах грунта – $P_б$, от веса поднимаемого разрыхленного грунта – P_r , от уплотнения в боковые стенки прорези – $P_{уб}$ и от наличия площадок износа на наконечнике – $P_{и}$.

$$P_n = P_n + P_б + P_r + P_{уб} + P_{и}. \quad (1)$$

Суммарное сопротивление на стойке рыхлителя будет равно:

$$\sum P_p = P_n + 2(P_{кх} + P_{др}) / \cos \chi, \quad (2)$$

где χ – угол установки уширителя, град.

Суммарная составляющая сопротивления рыхлению мерзлых грунтов наконечником рыхлителя определяется [1, 2]:

$$P_n = \sigma_p \cos \psi_1 \operatorname{tgr} \left\{ \frac{b}{\sin \psi_1} + \frac{\pi h_1}{4 \sin \psi_1} \operatorname{tgr} \psi_1 + \sin^{-1} \gamma \sqrt{[H(\operatorname{ctg} \delta_1 + \operatorname{ctg} \psi_2) - h_1 \operatorname{ctg} \psi_2]^2 + h_1 \operatorname{ctg}^2 \gamma} + \gamma_{тр} h_1^2 v^2 / 2g [H \operatorname{ctg} \psi_2 + h_1 (\operatorname{ctg} \psi_1 - \operatorname{ctg} \psi_2)] \right\} \left[(b \operatorname{ctg} \psi_1 - \operatorname{ctg} \psi_2) + (bH^2/h_1^2 + H \operatorname{ctg} \gamma) (\operatorname{ctg} \delta_1 + \operatorname{ctg} \delta_2) + h_1 (\pi \operatorname{ctg}^2 \psi_1 - 4 \operatorname{ctg} \gamma \operatorname{ctg} \psi_2) \right] + \sigma_{сж} b \left\{ [H - h_1 + \frac{H - h_1}{4b}] \frac{\operatorname{tgr} \rho}{\sin \rho} + t \sin(\delta_2 + \mu) / \cos \mu \right\}, \quad (3)$$

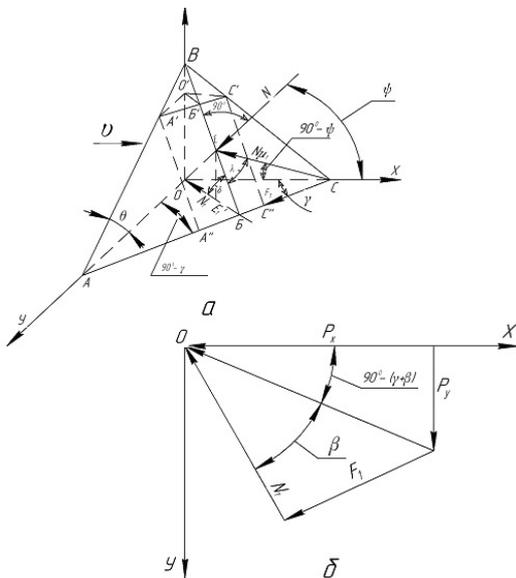
где σ_p , $\sigma_{сж}$ – предел прочности грунта соответственно разрыву и сжатию, кН/м²; b – ширина наконечника, м; h_1 – глубина расширяющейся части поперечного сечения борозды, м; ψ_1 , ψ_2 – углы сдвига грунта соответственно в верхней и нижней частях наконечника рыхлителя, град.; tgr – коэффициент внутреннего трения грунта; H – глубина рыхления, м; δ_1 – угол трения грунта по металлу, град.; γ – угол расширяющейся части прорези, град.; $\gamma_{тр}$ – объемный вес грунта, кг/м³; v – скорость рыхления грунта, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; t – ширина

площадки износа, m ; δ_2 – угол наклона площадки износа, град.; μ – угол внешнего трения грунта, град.

б) Зона косых клиньев $P_{кх}$.

Определение усилий на трехгранном клине имеет не только научное, но и большое практическое значение, так как позволит более обоснованно выполнять прочностные расчеты рабочих органов многих землеройных машин. Схемы расчет составляющих усилий резания косо поставленным клином показаны на рис. 1 [3, 4, 5].

Для определения действия сил на трехгранном усеченном параллельно основанию клине при установившемся движении использованы следующие допущения: клин острый, трение нижней грани о грунт отсутствует. Такой клин получается пересечением трех взаимно перпендикулярных осей координат наклонной плоскостью и дополнительной плоскостью параллельной основанию клина на высоте κ .



а – взаимодействия сил при работе косого клина; б – определения соотношения сил

Рис. 1. Схема сил, действующих на косой клин

Углы, определяющие положение косо поставленного клина во время резания грунта, следующие:

угол установки в плане к направлению движения в плоскости XOY (γ) и в вертикальной плоскости (δ), образованный пересечением клина плоскостью, проходящей через ось Z перпендикулярно нижней режущей грани AC , проекция которой на плоскость XOY – OB .

Боковая поверхность клина состоит из четырех составляющих: рабочей поверхности ABC , основания – AOC и боковых плоскостей AOB и COB . В конструкции уширителя к рыхлителю в качестве клина использована нижняя усеченная часть его, полученная сечением плоскостью параллельной

основанию клина на высоте $OO' = \kappa$. Усеченная рабочая боковая поверхность $A A^1 C^1 C$ равна

$$S_3 = (v \operatorname{ctg} \gamma \sin \gamma \operatorname{tg} \delta - \kappa)(\operatorname{ctg} \delta \operatorname{tg} \gamma + \operatorname{ctg} \delta \operatorname{ctg} \gamma) + b / \sin \gamma$$

$$\kappa / 2 \sin \delta, \quad (4)$$

где v – ширина клина вдоль оси Y (на рис. 1) обозначена AO .

Частица грунта в процессе резания поднимается на рабочую поверхность клина ABC не по нормальному направлению к режущей грани AC , а под углом $(90^\circ - \psi)$ к оси X . Линия действия сил трения $N\mu_1$ на рабочей плоскости клина образует с нормалью к лезвию AC угол λ . Из геометрических соотношений следует [3]:

$$\cos \psi = \sin \delta \sin \gamma; \quad (5)$$

$$\operatorname{ctg} \lambda = \cos \delta \operatorname{tg} \gamma \quad (6)$$

Составляющая сопротивления резанию грунта по оси X , которая определяется проецированием сил N и $\mu_1 N$ на эту ось (с учетом угла установки уширителя на стойку рыхлителя χ) равна:

$$P_{кх} = (N \cos \psi + \mu_1 N \sin \psi) / \cos \chi = 2PS_3 (\cos \psi + \mu_1 \sin \psi) / \cos \chi, \quad (7)$$

где μ_1 – коэффициент трения грунта по металлу; N – нормальная сила, действующая на рабочую поверхность клина, кН; χ – угол установки уширителя на стойку рыхлителя, град.

$$N = P S_3; \quad (8)$$

где P – величина давления на грани клина, $\text{кН} \cdot \text{м}^{-2}$; S_3 – площадь трапеции (боковой рабочей поверхности усеченного клина), м^2 .

$$P = C_0 \operatorname{ctg} \varphi_2 \left[e^{2\theta \operatorname{tg} \varphi_2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

где C_0 – сцепления грунта, $\text{кН}/\text{м}^2$; φ – угол внутреннего трения, град; θ – угол зоны радиального сдвига, рад.

Боковая составляющая проекции сил N_1 и F_1 на ось Y равна:

$$P_y = \operatorname{ctg}(\beta + \gamma)(N \cos \psi + \mu_1 N \sin \psi) / \cos \chi \quad (10)$$

Угол β находится из выражения

$$\operatorname{ctg} \beta = N_1 / F_1 = (\mu_1 \sin \lambda + \cos \delta \operatorname{ctg} \lambda) / \mu_1 \sin \lambda, \quad (11)$$

где N_1 – усилия, действующие нормально к режущей кромке AC , кН; F_1 – усилия, действующие вдоль режущей кромки AC , кН.

Эти усилия определяются проецированием сил N и $\mu_1 N$ на эти направления

$$N_1 = N \sin \delta + \mu_1 N \cos \delta \cos \lambda; \quad (12)$$

$$F_1 = \mu_1 N \sin \lambda \quad (13)$$

Вертикальная составляющая сопротивления резанию на ось Z , определяется проекцией сил на эту ось

$$P_z = (N \cos \delta - \mu_1 N \sin \delta \cos \lambda) / \cos \chi = P S_3 (\cos \delta - \mu_1 \sin \delta \cos \lambda) / \cos \chi, \quad (14)$$

Полученные составляющие сопротивления резанию грунта косым клином могут быть использованы при прочностных расчетах рабочих органов землеройных машин с таким инструментом.

в) Зона дисковых резов $P_{др}$.

Схема навески уширителя на стойку рыхлителя и зоны разрушения грунта соответственно

наконечником, косыми клиньями и дисковыми резцами показаны на рис. 2.

$$P_{1ДГ} = PS_1[(\mu_1 \cos\delta + \sin\delta)(1 + f_1)\sin(\alpha_1/2) + (\cos\delta - \mu_1 \sin\delta)\mu_1] / \cos\chi \quad (15)$$

$$P_{1ДВ} = PS_1(\mu_1 \cos\delta + \sin\delta)(1 + f_1)\cos(\alpha_1/2) / \cos\chi \quad (16)$$

$$P_{1ДБ} = PS_1(\cos\delta - \mu_1 \sin\delta) / \cos\chi \quad (17)$$

Характерные профили поперечного сечения борозд при рыхлении мерзлых грунтов рыхлителем с уширителем и без уширителя показаны на рис. 3.

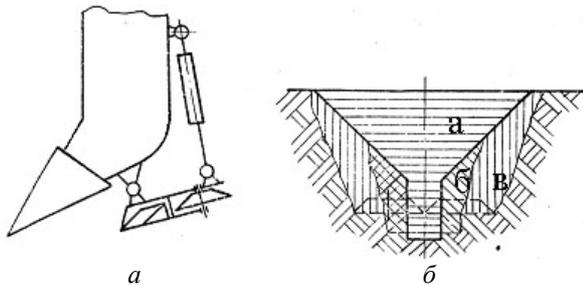


Рис. 2. Схема навески уширителя на стойку рыхлителя (а); (б) зоны (а, б, в) разрушения грунта соответственно: наконечником, косыми клиньями и дисковыми резцами

Высота h_p и угол зоны развала β_1 определен по формулам [6]:

$$h_p = bh / (b + 0,5k_x \alpha_p h), \quad (18)$$

$$\beta_1 = 90^\circ k_x (b + h + 0,39 k_x h) / (b + k_x h + 0,78 k_x h), \quad (19)$$

где α_p – угол рыхления грунта наконечником зуба рыхлителя, рад.; b – ширина наконечника рыхлителя, м; h – глубина рыхления, м; k_x – коэффициент, характеризующий способность грунтов к хрупкому разрушению

$$k_x = \sigma_p / \sigma_{сж} \quad (20)$$

где σ_p , $\sigma_{сж}$ – сопротивление грунта разрыву и одноосному сжатию, кПа.

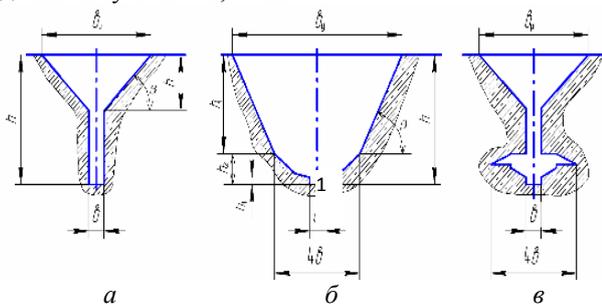


Рис. 3. Характерные профили поперечного сечения борозд полученных: а – при рыхлителем пластично-мерзлых грунтов без уширителя; б – уширителем с углом установкой 16°; в – в плотных талых грунтах с минимальным углом установки уширителя

Глубина зоны развала может быть определена в зависимости от глубины рыхления [7]: $h_p = (0,65 - 0,85)h$. Меньшее значение коэффициента соответствует большим значениям глубины рыхления.

ВЫВОДЫ

В процессе рыхления установка уширителя на стойку рыхлителя увеличивает в нижней части

борозды ширину захвата до 4 (b), позволяет приблизить режущие кромки косых клиньев и дисковых резцов к основанию борозды и обеспечить внедрение их в боковые стенки, исключив уплотнение грунта за счет его смятия и осуществив отрыв грунта от массива под углом скола 35–40°. При этом на прочных грунтах режущая кромка наконечника стойки рыхлителя выталкивается из борозды и снижает тягу трактора, а режущие кромки косых клиньев и дисковых резцов затягивают стойку рыхлителя в грунт, увеличивая его тягу, поэтому установка уширителя способствует улучшению тяговых показателей агрегата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горбачев, Ю.Г., Шапирштейн Р.Б. Анализ формирования нагрузок при разрушении грунта резцом / Ю. Г. Горбачев, Р. Б. Шапирштейн // Строительные и дорожные машины. – 1991. – №4. – С. 2–9.
2. Хмара, Л. А. Совершенствование конструкции рабочего органа рыхлителя для разработки прочных и мерзлых грунтов / Л. А. Хмара, С. В. Шатов // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 10. – С. 44 – 49.
3. Алексеева, Т. В. Дорожные машины. Ч. I. Машины для земляных работ / Т. В. Алексеева, К. А. Артемьев, А. А. Бромберг и др. / 3-е изд. доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 504 с.
4. Горячкин, В. П. Собрание сочинений. Т.2. Изд. 2-е.– М., «Колос», 1968.– 455 с.
5. Хмара, Л. А. Научные основы формирования многокомпонентных рабочих органов землеройных машин: дис. ... докт. техн. наук / Л. А. Хмара. – Днепропетровск. 1983. – 382 с.
6. Емелин, В. И. Разработка мерзлых грунтов: теория и практика: монография / В. И. Емелин. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 248 с.
7. Машины для разработки мерзлых грунтов. Под ред. к.т.н. В. Д. Телушкина. М., «Машиностроение», 1973. 272 с.

Желудкевич Рышард Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры авиационных горюче-смазочных материалов, Институт нефти и газа ФГАОУ ВО СФУ, тел. 8(913)5600580, e-mail: kaiser170174@mail.ru

Кайзер Юрий Филиппович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой авиационных горюче-смазочных материалов, Институт нефти и газа ФГАОУ ВО СФУ, тел. 8(923)3277999, e-mail: kaiser170174@mail.ru

Шрам Вячеслав Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры топливообеспечения и горюче-смазочных материалов, Институт нефти и газа ФГАОУ ВО СФУ, тел. 8(950)4014163, e-mail: Shram18rus@mail.ru

Лысянников Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры авиационных горюче-смазочных материалов, Институт нефти и газа ФГАОУ ВО СФУ, тел. 8(950)4071604, e-mail: av.lysyannikov@mail.ru

Тюканов Василий Леонидович – старший преподаватель кафедры авиационных горюче-смазочных материалов, Институт нефти и газа, ФГАОУ ВО СФУ, тел. 8(923)3277666, e-mail: vastuk85@mail.ru

Егоров Алексей Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин, Институт механики и машиностроения, ФГБОУ ВО ПГТУ, тел. 8(964)8612121, e-mail: aleksej_egorov@bk.ru

MATHEMATICAL MODEL OF SHOWING OF SNOW-ICE AND FROZEN SOIL WITH REDUCER WITH EXPANDER

R.B. Zhelukevich¹, Yu.F. Kaiser¹, V.G. Shram¹, A.V. Lysyannikov¹, V.L. Tyukanov¹, A.V. Egorov²

¹*Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas, Krasnoyarsk*

²*Povolzhsky State Technological University, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Yoshkar-Ola*

Abstract – When equipping oil and gas fields, the main technological operation in the winter is the cultivation of snow-ice and frozen soil. The determination of efforts on a trihedral wedge is not only scientific, but also of great practical importance, since it will allow more reasonably carry out strength calculations of the working bodies of many earthmoving machines. The following assumptions were used to determine the action of forces on a trihedral wedge parallel to the base of the wedge with steady motion: the wedge is sharp, there is no friction of the lower face on the ground. Scientific novelty is represented by the developed theoretical principles in the formation and implementation of new technical solutions. Mathematical models of the process of interaction of a disk tool with solid media are developed. Analytical dependences of the cutting force on the type of cut and the properties of the medium are obtained, taking into account the basic geometric parameters of such a tool. In the process of loosening, the installation of the extender on the cultivator rack increases the working width in the lower part of the furrow, makes it possible to bring the cutting edges of oblique wedges and disk cutters closer to the furrow base and to ensure their introduction into the side walls, eliminating soil compaction due to crushing and soil separation from the massif under a cleavage angle of 35–40°. At the same time, on strong soils, the cutting edge of the tip of the cultivator strut is pushed out of the furrow and reduces tractor traction, and the cutting edges of oblique wedges and disk cutters tighten the cultivator strut into the ground, increasing its traction, so installing an expander improves the traction performance of the unit.

Index terms: mathematical model, cultivation, frozen soil, cultivator, expander

REFERENCES

1. Gorbachev, Yu.G., Shapirshtein RB Analysis of the formation of loads during the destruction of soil by a cutter / Yu. G. Gorbachev, R. B. Shapirshtein // Construction and road machines. - 1991. - No. 4.– P. 2–9.
2. Khmara, L. A. Improving the design of the working body of the cultivator for the development of strong and frozen soils / L. A. Khmara, S. V. Shatov // Construction and road machines. - 2009. - No. 10. - S. 44 - 49.
3. Alekseeva, T. V. Road cars. Part I. Machines for earthworks / T.V. Alekseeva, K.A. Artemyev, A.A. Bromberg et al. / 3rd ed. add. - M.: Mechanical Engineering, 1972. - 504 p.
4. Goryachkin, V. P. Collected Works. T.2. Ed. 2 nd. – M., Kolos, 1968.– 455 s.
5. Khmara, L. A. Scientific basis for the formation of multicomponent working bodies of earth-moving machinery: dis. ... doctor. tech. Sciences / L.A. Khmara. - Dnepropetrovsk. 1983.- 382 p.
6. Emelin, V. I. Development of frozen soils: theory and practice: monograph / V. I. Emelin. - Krasnoyarsk: IPK SFU, 2008. -- 248 p.
7. Machines for the development of frozen soils. Ed. Ph.D. V. D. Telushkina. M., "Mechanical Engineering", 1973. 272 p.

Zhelukevich Ryshard Borisovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Aviation Combustive-Lubricating Materials, Institute of Oil and Gas FSAEI of Siberian Federal University, tel. 8 (913) 5600580, e-mail: kaiser170174@mail.ru

Kaizer Yuri Filippovich - Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Aviation Combustive-Lubricating Materials, Institute of Oil and Gas FSAEI of Siberian Federal University, tel. 8 (923) 3277999, e-mail: kaiser170174@mail.ru

Shram Vyacheslav Gennadievich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Fuel Supply and Combustive-Lubricating Materials, Institute of Oil and Gas FSAEI of Siberian Federal University, tel. 8 (950) 4014163, e-mail: Shram18rus@mail.ru

Lysyannikov Aleksey Vasilievich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aviation Combustive-Lubricating Materials, Institute of Oil and Gas FSAEI of Siberian Federal University, tel. 8 (950) 4071604, e-mail: av.lysyanikov@mail.ru

Tyukanov Vasily Leonidovich - Senior Lecturer, Department of Aviation Combustive-Lubricating Materials, Institute of Oil and Gas FSAEI of Siberian Federal University, tel. 8 (923) 3277666, e-mail: vastuk85@mail.ru

Egorov Aleksey Vasilievich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Machines, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, FSBEI HE PSU, tel. 8 (964) 8612121, e-mail: aleksej_egorov@bk.ru