

13. Рузер Л. С. Радиоактивные аэрозоли. М.: Энергоатомиздат. - 2001. - 231 с.
14. Schurath U., Naumann K. H., Heterogeneous process involving atmospheric particulate matter. Pure Appl. Chem. 1998. – Vol. 70(7). – P. 1353-1361.
15. Wahner A., Mentel T.F., Sohn M. et al. Heterogeneous reaction of N₂O₅ on sodium nitrate aerosol. Journal of Geophysical Research. 1998. – Vol. 103(D23). – P. 31103 - 31112.
16. Weis D.D., Ewing G.E. The reaction of nitrogen dioxide with sea salt aerosol. J. Phys. Chem. A. 1999. – Vol. 103. – P. 4865 - 4873.
17. Fenter F.F, Caloz F., Rossi M.J. Heterogeneous kinetics of N₂O₅ uptake on Salt, with a systematic study of the role of surface presentation (for N₂O₅ and HNO₃). J. Phys. Chem. 1996. – Vol. 100. – P. 1008 - 1019.
18. DING J., ZHU T. Heterogeneous reactions on the surface of fine particles in the atmosphere. Chinese Science Bulletin. 2003. - Vol. 48. - № 21. – P. 2267 – 2276.
19. Седов В. М., Александров А. Б., Валль А. И. и др. О природе радиационного нитрования поверхности хлорида калия. Письма в ЖТФ. - 1984. - Т. 10, вып. 5. - С. 310 - 313.
20. Кеффер Р. Г. Исследование физико-химических процессов, протекающих в системе «хлориды щелочных металлов - NO_x - O₂»: Автореф. дис. канд. хим. наук. Пермь. 1969. - 18 с

УДК 624.139

С.И. Васильев

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СЕЗОННО-МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Приводится обоснование модели мерзлого грунта с включениями по результатам экспериментальных исследований. Описаны возможные расчетные схемы взаимодействия резца с грунтом.

Ключевые слова: процесс резания мерзлых грунтов, зона пластических деформаций, прочность грунта усилие резания, подача, ширина резца, гранулометрический состав включений, размер включений.

Методикой экспериментальных исследований процесса резания сезонно-мерзлых грунтов предусмотрено принятие гипотезы состояния грунта и модели взаимодействия с ним рабочих органов роторных траншейных экскаваторов.

Процесс разрушения мерзлых грунтов поступательно движущимся инструментом землеройно-транспортных машин в соответствии с исследованиями [1, 2] может быть разбит на два этапа. Первый этап – образование и развитие зоны пластических деформаций перед инструментом или включением. Второй этап характеризуется отделением крупных элементов, вызванным повышением напряжений в упругой зоне до критической величины.

Для описания модели взаимодействия мерзлого грунта и поступательно движущегося инструмента предпочтительно использована модель плоской деформации жестко-

пластического тела при неустановившемся пластическом течении с геометрическим подбием [3].

Однородный мерзлый грунт, в зависимости от его типа и состояния, может вести себя, как материал, обладающий различной степенью сжимаемости, т. е. может быть практически несжимаемым или обладать способностью сжиматься в начальный период взаимодействия с резцом до перехода в пластическое состояние. Одной из особенностей роторных рабочих органов является переменная толщина стружки при движении резца из нижнего положения до точки выхода из грунтового забоя (рис. 1). В процессе движения резца в среде однородного мерзлого грунта возникает пластическая зона, а в момент достижения предельного напряженного состояния происходит смещение ядра уплотнения и его отрыв от массива грунта.

При внедрении резца роторного траншейного экскаватора в мерзлый грунт с гравийно-галечниковыми включениями формируется сложное напряженное состояние в зоне расположения включений, перед которыми формируется опережающее напряженное состояние с образованием уплотненного ядра. В момент достижения предельного напряженного состояния в верхней части массива грунта гравийно-галечниковые включения выталкиваются в зоны с наименьшим напряженным состоянием или разрезаются резцом (рис. 2) [4]. Вектор выталкивающего усилия определяется не только формой включений, но и толщиной стружки и схемой приложения нагрузки со стороны резца на включение (выше или ниже геометрического центра). В частно-

сти как показали исследования, для малых подач (при малой толщине стружки) включения, как правило, выталкиваются в разработанный грунт (в сторону свободной поверхности).

В обоих случаях процесс разрушения грунта рассматривается как частный случай внедрения соответствующего штампа в жестко-пластическую среду, ограниченную плоскостью.

На рис. 3 и 4 показаны схемы резания грунта резцом траншейного экскаватора. В качестве допущений принимаем: инструмент острый и абсолютно жесткий; объемные силы равны нулю.

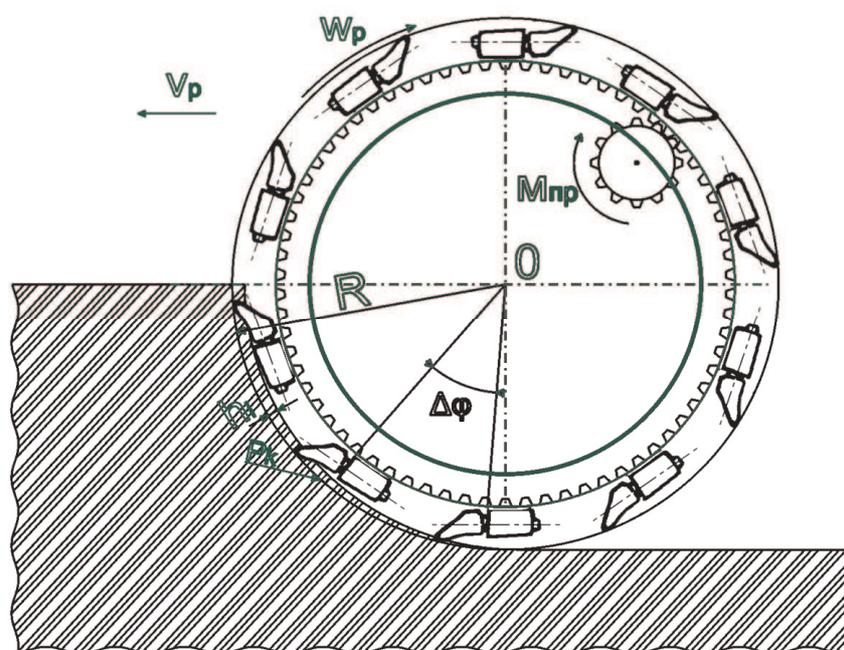


Рис. 1. Расчетная схема разработки грунта траншейным экскаватором.



Рис. 2. Разрезанное включение жильного кварца.

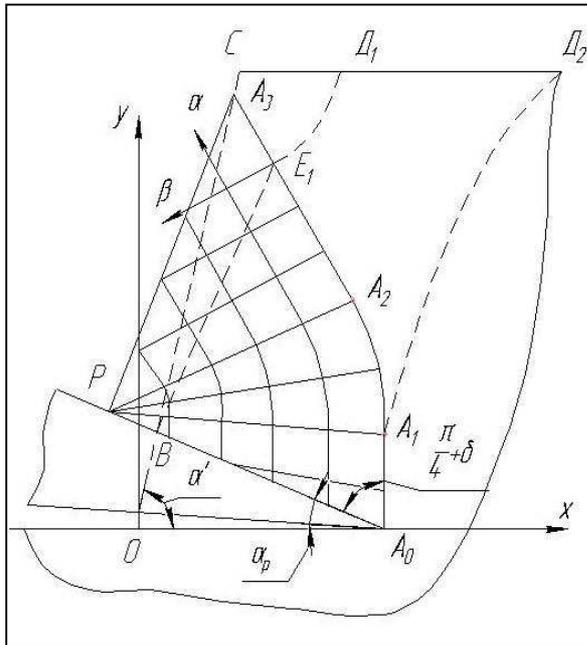


Рис. 3. Расчетная схема резания при $\delta < \pi/2 - \alpha_p$.

На рисунках обозначены: α_p – угол резания инструмента, a – длина контакта режущей кромки (PA_0), x – текущая координата режущей кромки, α, β – параметры двух ортогональных семейств линий скольжения. Пунктирными линиями показаны возможные варианты развития поверхностей, по которым происходит отделение элементов грунта с углом α' .

Начало прямоугольных координат принято в точке, соответствующей моменту отделения последнего крупного элемента (т. О). При этом образуется поверхность ОС, наклонная к оси x под углом α' . Область $A_0A_1A_2A_3P$ перед резцом находится в пластическом состоянии и развивается геометрически подобно самой себе [5].

Мерзлые грунты как разрабатываемая среда обладают рядом специфических свойств, существенно влияющих на возможности их разработки. Их изнашивающая способность и давления, действующие на изнашиваемые поверхности рабочего инструмента, в десятки раз выше аналогичных показателей талых грунтов. Особенно сильно сказывается износ на показателях работы траншейных экскаваторов, инструмент которых при разрушении мерзлых грунтов срезает относительно тонкие стружки. В результате, как показывает практика, при разработке высокоабразивных видов мерзлых грунтов (например, супесей и песков) заметное снижение производительности машин вследствие износа инструмента может

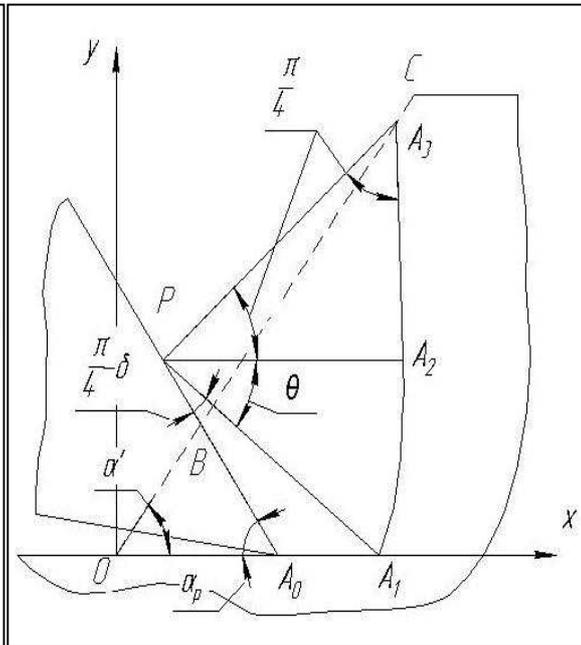


Рис. 4. Расчетная схема резания при $\delta \geq \pi/2 - \alpha_p$.

наблюдаться после проходки нескольких метров траншеи, а время, затрачиваемое на замену изношенного инструмента, становится соизмеримым с периодом его стойкости. Специфика рабочего процесса траншейного экскаватора такова, что его рабочий орган контактирует с грунтом по достаточно большой траектории, при этом проходит от нижней точки грунта, где располагаются талые – теплые слои грунта к слоям, имеющим максимальную отрицательную температуру, что позволяет рассматривать разрабатываемый грунт, как двухфазную среду. Значит, при оценке температурного режима грунта следует учитывать распределение температур по глубине забоя.

При стендовых исследованиях температура грунта находилась в пределах от 0 до -15°C , что соответствует числу ударов плотномера ДорНИИ от 50 до 150; влажность грунта в пределах 17–21 %, что характеризует натурное состояние грунтов Сибири. Параметры резцов и режимы резания варьировались в диапазоне, характерном для работы траншейных экскаваторов: ширина резца $b = 10\text{--}35$ мм; глубина резания $h = 10\text{--}35$ мм; скорость резания $V_p = 0,8\text{--}3,2$ м/с; угол резания $\alpha = 45\text{--}80^\circ$ с углом резания 80° , задним углом 10° и углом клина передней поверхности 140° . Размеры включений приняты согласно таблице 2 и варьировались от 20 до 80 мм, что соответствует 1-4 расчетным видам (таблица 2).

Экспериментальные исследования однородных грунтов и грунтов с включениями проведены на стенде с использованием методики планирования трехфакторного эксперимента. Методикой экспериментальных исследований по определению сил резания сезонно-мерзлых грунтов предусматривалось решение следующих задач:

- экспериментальное установление влияния прочности грунта, геометрических параметров резца на усилие резания сезонно-мерзлых грунтов;

- проверка результатов теоретических исследований влияния размеров включений и их процентного содержания в мерзлом грунте на усилие резания;

- уточнение, на основании наблюдений за процессом разрушения мерзлого грунта с включениями, модели формирования сложного напряженного состояния в зоне расположения включений.

С целью получения расчетных зависимостей по определению усилия резания на резцах при различных соотношениях толщины стружки и шага резания были проведены исследования процесса резания мерзлого грунта с гравийно-галечниковыми включениями резцами с параметрами, характерными для траншейных экскаваторов типа ЭТР-132Б, ЭТР-134, ЭТР-160 и БТМ-ТМГ.

Для обеспечения повторяемости температуры и влажности в образцах мерзлых грунтов и уменьшения чистой ошибки экспериментальных исследований каждый из лабораторных образцов выдерживался во влагонепроницаемой оболочке в течение 24 часов при той температуре, которая соответствует температуре при эксперименте. Относительная погрешность показателей температуры и влажности грунта в лабораторных образцах для начальных отрицательных температурах составила 5 %, для нижних значений отрицательных температур – 10 %, что соответствует рекомендациям [6].

Экспериментальные исследования процесса резания грунтов с гравийно-галечниковыми включениями на роторных стендах затруднительны, так как задачу моделирования распределения включений необходимо решать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости одновременно. С этой точки зрения предпочтительно исследование процесса резания грунтов на стендах одиночного резания. Исследования проведены на искусственно приготовленных образцах мерзлого суглинка, верхний слой которого насыщался отдельными включениями, расположенными в образце по линии движения резца.

Для сопоставления результатов экспериментальных и теоретических исследований по влиянию размеров включений и их процентного содержания в мерзлом грунте на усилие резания проведены двухфакторные исследования.

При исследовании влияния размеров и процентного содержания включений на величину коэффициента усилия резания включений рассортированы на 10 групп по их максимальному размеру (таблица 3).

Таблица 1

Матрица планирования трехфакторного эксперимента на стенде одиночного резания мерзлого суглинка

№ опыта	Уровни факторов в кодированных значениях			Уровни факторов в натуральных значениях			Усилие резания P_k , кН
	x_1	x_2	x_3	Прочность грунта, $C(x_1)$	Подача резца, h , мм (x_2)	Ширина резца, b , мм (x_3)	
1	–	–	+	50	10	35	66,89
2	+	–	–	150	10	10	423,38
3	–	+	–	50	35	35	74,48
4	+	+	+	150	35	35	266,38
5	–	–	–	50	10	10	27,92
6	+	–	+	150	10	35	239,22
7	–	+	+	50	35	35	74,48
8	+	+	–	150	35	10	11,21

Таблица 2

*Гранулометрический состав грунтов,
планируемых к разработке в рассматриваемом регионе*

Расчетный случай	Характеристика грунта	Вероятность разработки		Содержание фракций, %								
				Размер частиц, мм								
		Общая	В том числе	< 0,005	0,005–0,1	0,1–0,5	0,5–2,0	2–10	10–30	30–70	70–200	> 200
1	Однородные грунты и грунты с каменистыми включениями до 10 мм	0,741	0,258	7–28	13–53	30–80	0–18					
			0,183	20–33	48–68	2–24						
			0,178	4–22	12–44	15–70	8–28	0–22				
			0,122	–	71–78	22–29						
2	Грунты с каменистыми включениями 10–30 мм	0,121	0,053	3–13	22–43	23–56	5–17	4–11	2–11			
			0,034	8–18	9–16	13–27	11–15	17–29	15–27			
			0,025	–	12–20	18–29	18–22	12–36	13–27			
			0,009	0–17	10–55	12–29	2–19	5–11	5–11			
3	Грунты с включениями 30–70 мм	0,044	0,025	4–14	5–14	15–48	6–13	15–20	14–26	7–17		
			0,019	4–14	25–53	16–24	10–16	7–17	6–11	6–14		
4	Грунты с каменистыми включениями 70–200 мм	0,046	0,023	9–14	9–26	16–34	7–11	8–17	10–18	11–21	1–4	
			0,010	14–17	38–56	10–14	1–3	2–5	3–7	5–11	5–10	
			0,009	–	7–10	15–17	11–17	15–35	25–28	7–17	6–17	
			0,004	3–4	25–50	16–40	5–11	3–12	4–8	3–8	3–8	
5	Крупнообломочные грунты с включениями более 200 мм	0,048	0,032	6–7	8–11	7–13	8–16	26–36	12–17	6–8	9–15	8–12
			0,016	3–8	30–40	20–26	5–8	4–10	4–18	2–4	2–4	1–3

Таблица 3

Группы гравийно-галечниковых включений

Номер группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размер включений, мм	5–10	10–15	15–25	25–40	40–55	55–75	75–100	100–125	125–150	150–180

Процентное содержание включений, характерное для грунтов Красноярского края, Иркутской области и Республик Саха и Бурятия, находится в пределах от 7 до 30 %.

Результаты исследования усилий резания однородных грунтов и грунтов с включениями показали, что влияние процентного состава включений и размеров включений может быть оценено коэффициентом вариации усилий резания K_ζ :

$$K_\zeta = 0,516 + 0,2622\zeta - 0,00043n^2.$$

Учитывая, что каждый из факторов имеет большое количество уровней, и каждый из уровней значим, для проведения экспериментальных исследований применен дробный двухфакторный эксперимент. При этом для первого фактора – размер включений (ζ) – принято 6 уровней, для второго фактора – процентное содержание (n) – принято 4 уровня, отражающих наиболее вероятные условия эксплуатации траншейных экскаваторов.

Выводы

Результаты стендовых испытаний и натуральных исследований позволили выявить закономерности разрушения мерзлых грунтов с включениями:

- процесс взаимодействия мерзлого грунта с включениями и резцов описывается моделью плоской деформации жестко-пластического тела, а разрабатываемый грунт в траншее как двухфазную среду;
- наибольшие по величине усилия резания и подачи возникают при разрезании включений, размеры которых в каждой из плоскостей превышают ширину резца;
- среднепиковые нагрузки при резании мерзлых грунтов с включениями превышают среднепиковые нагрузки при резании мерзлого однородного грунта в 4–6 раз;

- при разрезании включений того же гранулометрического состава одинаковой крупности усилия на резцах шириной 18 и 25 мм равны, при этом усилия подачи у резцов шириной 25 мм были больше (в отдельных случаях почти в два раза), чем у резцов шириной 18 мм.

- коэффициент вариации сил резания мерзлых грунтов с включениями описывается уравнением второго порядка, зависящим от процентного содержания включений и их размеров.

Литература

1. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическим способом. М.: Машиностроение, 1968. 399 с.
2. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высш. шк., 1969. 608 с.
3. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. М.: Высш. шк., 1981. 335 с.
4. Разработка сезонномерзлых грунтов Восточной Сибири траншейными экскаваторами: моногр. / С. И. Васильев [и др.]; Сиб. федер. ун-т. Красноярск: ИПК СФУ, 2010. 139 с.
5. Евдокимов А.Н., Васильев С.И., Жубрин В.Г. Аналитическое определение силы сопротивления внедрению инструмента в мерзлый грунт // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 3(11). С. 115-118.
6. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов / С.С. Вялов, С.Э. Городецкий, В.Ф. Ермаков, А.Е. Зацарская, Н.К. Пекарская. М.: Наука, 1966. 350 с.