

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ
С ГРАВИЙНО-ГАЛЕЧНИКОВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ РОТОРНЫМИ
РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

Приведены результаты исследования процесса резания мерзлых грунтов роторными рабочими органами траншейных экскаваторов с учетом схемы расстановки режущих элементов, физико-механических характеристик и гранулометрического состава гравийно-галечниковых включений.

Ключевые слова: грунт, гравийно-галечниковые включения, режим резания, усилие резания коэффициент режима резания.

Траектория резания грунта траншейных экскаваторов с роторным рабочим органом складывается из поступательного движения базовой машины и вращательного движения ротора. Толщина стружки при этом увеличивается от нуля в нижней части траншеи до максимальной величины на уровне горизонтальной оси ротора. Поэтому при определенном расстоянии между резцами в соседних линиях резания на роторе (шаге резания) форма элементов стружки, срезаемой каждым резцом, постоянно меняется на протяжении всего пути резания.

На основании исследований [1] наиболее рациональной для траншекопателей является ступенчато-шахматная схема расстановки резцов на рабочем органе при шаге резания, превышающем ширину резца.

При данной схеме расстановки резцов в нижней части траншеи имеет место глубокое блокированное резание, которое по мере движения резца вверх переходит в сотовое. Это объясняется разным соотношением толщины стружки и шага резания в различных точках траектории движения резца.

Рациональная схема расстановки резцов при этом может быть выбрана на основе расчетов различных вариантов схем. С целью получения расчетных зависимостей по определению усилия резания на резцах при различных соотношениях толщины стружки и шага резания были проведены исследования процесса реза-

ния мерзлого грунта с гравийно-галечниковыми включениями резцами с параметрами, характерными для траншейных экскаваторов типа ЭТР-132Б, ЭТР-134, ЭТР-160.

Анализ экспериментальных данных, полученных авторами, показал, что среднемаксимальная величина касательной составляющей усилия резания P_k увеличивается с ростом подачи резания. Это объясняется увеличением объема не разрушенных целиков и переходом из сотового в глубоко блокированное резание.

Для более наглядного представления об изменении среднемаксимальной величины касательной составляющей усилия резания при изменении шага t сравним ее с величиной P_k при блокированном резании. Для сравнительного анализа введем коэффициент режима резания:

$$K_p = \frac{t - b}{h},$$

где t – шаг расстановки резцов; b – ширина резца; h – подачи глубина резания.

График (рис. 1), где по оси ординат отложено отношение усилия резания при ступенчато-шахматной схеме расстановки резцов P'_k к усилию блокированного резания P_k , а по оси абсцисс – коэффициент режима резания, показывает, что усилие для средних резцов вначале меньше P_k , но затем с ростом коэффициента резания увеличивается и может превысить его более чем в полтора раза.

* - автор, с которым следует вести переписку.

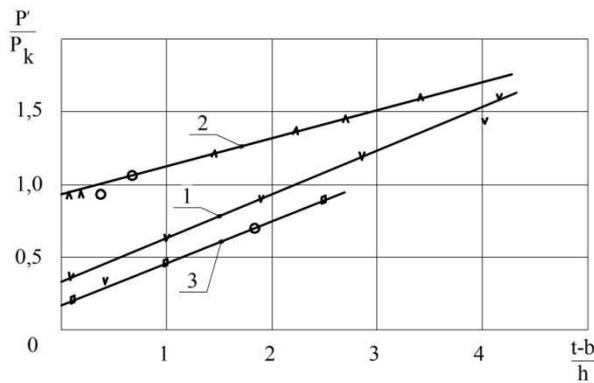


Рис. 1. Зависимость относительного усилия коэффициента режима резания при ступенчато-шахматной схеме резцов: 1 и 2 соответственно для резцов в средних и крайних линиях резания.

Графическая зависимость 1 получена для резцов в средних линиях ряда, зависимость 2 – для резцов в крайних линиях ряда, зависимость 3 – для средних резцов при резании грунта с повышенным коэффициентом включений размером от 40 до 20 мм.

Для условий эксперимента максимальная величина отношения составляла 1,7–1,91. В этом случае имело место резание, близкое к глубоко блокированному. Следует отметить, что по сравнению с однородными грунтами при увеличении коэффициента режима резания величина относительного усилия резания для грунта с включениями растет медленнее, что указывает на более хрупкий характер мерзлых грунтов, содержащих гравийно-галечниковые включения.

Из графика видим, что зависимость относительного усилия от коэффициента режима резания при различных параметрах резцов для данного типа грунта может быть аппроксимирована линейным графиком.

Относительная ошибка при этом составляет $\pm 9,6\%$. Усилия резания резами, находящимися в крайних линиях резания, также зависят от значения коэффициента режима резания и возрастают при его увеличении. При малых значениях коэффициента режима резания относительное усилие для крайних резцов больше, чем для средних, но при увели-

чении эта разница уменьшается, стремясь в пределе к нулю.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить следующие расчетные зависимости для определения усилия резания при ступенчато-шахматной схеме расположения резцов на рабочем органе:

для резцов в крайних линиях резания

$$P'_k = 0,982 + 0,2113 \left(\frac{t-b}{h} \right) P_k; \quad (1)$$

для резцов в средних линиях резания

$$P'_k = 0,516 + 0,2622 \left(\frac{t-b}{h} \right) P_k. \quad (2)$$

Здесь P_k – усилие блокированного резания.

Для определения мощности, расходуемой на резание, кроме среднemaxимальной величины усилия резания, необходимо знать ее среднюю величину. Согласно рекомендациям Ю. А. Ветрова, среднее усилие может быть определено по формуле

$$P_c = P_k K_3,$$

где K_3 – коэффициент энергоемкости.

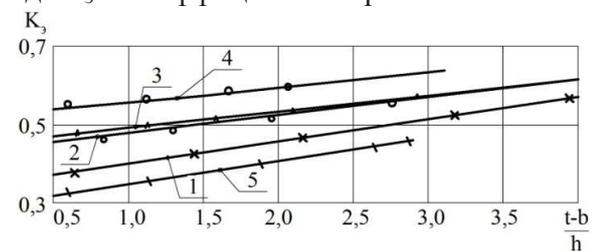


Рис. 2. Зависимость коэффициента энергоемкости K_3 от коэффициента режима резания.

Как показали исследования, величина K_3 возрастает при увеличении шага резания t . Из графика (рис. 2) видим, что зависимость K_3 от коэффициента режима резания при различных параметрах описывается уравнением прямой.

Коэффициент корреляции показателя энергоемкости равен 0,72.

Зависимости 1 и 2 получены для резцов в средних и крайних линиях резания. Зависимость 1 выявлена для резцов шириной 35 мм, толщиной стружки 11 мм на грунтах влажностью 19,1 %, прочностью грунта 12 по плотномеру ДорНИИ. Зависимость 2 определена для толщины стружки 16 мм на грунтах влажностью

19,1 %, прочности грунта 120 по плотномеру ДорНИИ. Зависимости 3 и 4 получены для резцов в средних и крайних линиях резания. Зависимость 3 соответствует ширине резца 18 мм, толщине стружки 14 мм, влажности грунта 20,8 %, прочности 180 по плотномеру ДорНИИ. Зависимость 4 получена при толщине стружки 20 мм, ширине резца 25 мм, прочности 120 по плотномеру ДорНИИ; зависимость 5 – при толщине стружки 16 мм, ширине резца 25 мм, прочности 325 по плотномеру ДорНИИ. Зависимость 4 характерна для резцов в крайних линиях резания. Зависимость 5 характерна для резцов в средних линиях резания.

При малых значениях коэффициента режима резания коэффициент энергоёмкости меньше по величине, чем у заблокированного резания и у однородных мерзлых грунтов. Это объясняется тем, что при ступенчато-шахматной схеме расстановки резцов, вследствие влияния предыдущих резцов на последующие, часто происходят сколы крупных элементов, вырыв включений, после которых резец испытывает незначительные нагрузки.

Проведенная математическая обработка экспериментальных данных при условии, что зависимость коэффициента энергоёмкости от угла резания можно считать прямолинейной, позволила получить следующие расчетные формулы:

для резцов в крайних линиях резания:

$$K_v = \left[0,446(1 - 0,00038C)(1 + 0,00493\alpha) + 0,0404 \frac{t-b}{h} \right] (1 - 0,049V_p)$$

для резцов в средних линиях резания:

$$K_v = \left[0,406(1 - 0,00038C)(1 + 0,00482\alpha) + 0,020 \frac{t-b}{h} \right] (1 - 0,049V_p).$$

Эти формулы справедливы в диапазоне изменения коэффициента энергоёмкости от 0,5 до 4,2.

Касательная составляющая усилия резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями резцами, установленными по ступенчато-шахматной схеме, имеет прямолинейную зависимость от угла установки резцов и от коэффициента режима резания. Увеличение коэффициента резания мерзлых грун-

тов резцами, установленными по ступенчато-шахматной схеме, способствует выравниванию коэффициента вариации сил резания на крайних и средних резцах.

Рассмотрим влияние скорости и угла резания на сопротивление резанию при изменении шага расстановки резцов.

Изменение шага резания приводит к изменению взаимодействия резца с грунтом. Поэтому для определения влияния угла и скорости резания при ступенчато-шахматной схеме расстановки резцов были проведены экспериментальные исследования, которые показали, что при увеличении шага резания влияние угла и скорости резания на касательную составляющую усилия резания возрастает.

Математическая обработка исследований на стенде позволила получить следующие коэффициенты, учитывающие влияние скорости K'_v и угла резания K'_α на касательную составляющую усилия резания при ступенчато-шахматной схеме расстановки резцов на рабочем органе:

для средних резцов

$$K_v = K'_v \left(0,98 + 0,023 \frac{t-b}{h} \right); \quad (3)$$

для крайних резцов

$$K_v = K'_v \left(0,99 + 0,031 \frac{t-b}{h} \right), \quad (4)$$

где K'_v – коэффициент, учитывающий изменение усилия заблокированного резания от скорости резания;

для средних резцов

$$K_\alpha = K'_\alpha \left(0,98 + 0,03 \frac{t-b}{h} \right); \quad (5)$$

для крайних резцов

$$K_\alpha = K'_\alpha \left(1 + 0,033 \frac{t-b}{h} \right); \quad (6)$$

где K'_α – коэффициент, учитывающий изменение усилия заблокированного резания от угла резания.

Увеличение значения коэффициентов K_v и K_α при увеличении отношения можно объяснить ростом заблокированности резцов.

Касательная составляющая усилия резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями резцами, установленными по ступенчато-шахматной схеме, линейно зависит как от скорости резания, так и от угла резания, при этом усилия на средних и крайних резцах от угла установки резцов имеют отличия не более, чем на 3–5 %.

Рассмотрим зависимость усилия резания от влажности и гранулометрического состава мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Одним из основных факторов, влияющих на сопротивляемость мерзлых грунтов резанию, является влажность. На рис. 3 приведены графики зависимости среднемаксимальной касательной составляющей усилия резания от влажности грунтов, содержащих гравийно-галечниковые включения. Влажность грунтов изменялась от 5 до 30 %.

Зависимости показывают, что при небольшой влажности вмещающей среды усилия резания представляют собой небольшие величины. Данные зависимости подтверждают, что образовавшегося при замерзании льда недостаточно для цементирования грунта в плотный монолит, в результате чего в грунте образуется так называемая «сухая» мерзлота, и усилия резания в этом случае в большой степени будут зависеть от размеров гравийно-галечниковых включений.

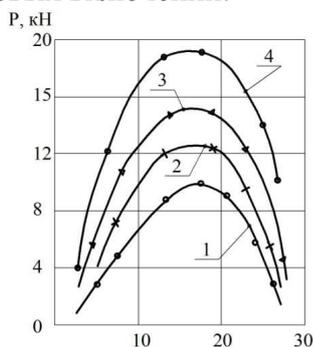


Рис. 3. Зависимость усилия резания от влажности.

Разрушение грунта происходит в наиболее слабых местах – по плоскостям ледяных прослоек. По мере увеличения влажности усилия резания вначале воз-

растают до определенной величины, после чего наблюдается их спад. Для нашего случая граничное значение влажности составляет 17–19 %.

При дальнейшем увеличении влажности, после достижения полной молекулярной влагоемкости, начинается разрушение силикогирующей пленки, а также разбухание и ослабление цементирующих элементов грунта, что приводит к уменьшению усилия, необходимого для его разрушения [2].

Снижение усилия резания при увеличении влажности грунта, содержащего включения выше определенной точки, можно объяснить и второй причиной: при замерзании влажных грунтов, начиная с температуры, соответствующей моменту прекращения расширения грунта, количество незамерзшей воды растет. Объем грунта не увеличивается, так как температурное сжатие скелета грунта идет более интенсивно, чем расширение замерзшей воды. Избыток влаги при замерзании, освобождаясь, обволакивает отдельные включения водяной пленкой, с повышением влажности толщина пленки увеличивается, наступает раздвигание частиц грунта замерзающей водой. Связь включения с грунтом происходит через образовавшуюся ледяную линзу. Временное сопротивление разрыву падает. Включение легче вырывается из массива при встрече с резцом.

На рис. 4 показан образец грунта влажностью $\omega = 18,8\%$. На этом образце большая часть включений при взаимодействии с резцом была разрезана. Усилия резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями зависят как от размеров включений, так и от их процентного содержания. Максимальные нагрузки, возникающие на резцах при встрече с твердыми включениями, зачастую являются одной из основных причин поломки инструмента и элементов трансмиссии экскаваторов. Для расчетов усилия резания, в зависимости от размеров включений, проводились опыты как по резанию образцов, в которые включения

закладывались случайным образом, так и образцов с ориентированными относительно линий резания включениями.

Осциллограммы изменения касательной составляющей сил резания для образцов с ориентированными включениями состоят из сравнительно однородных участков, соответствующих резанию вмещающей среды и кратковременных всплесков, возникающих при встрече режущих элементов с твердыми включениями, которые при этом разрушаются, вырываются или вдавливаются во вмещающую среду.

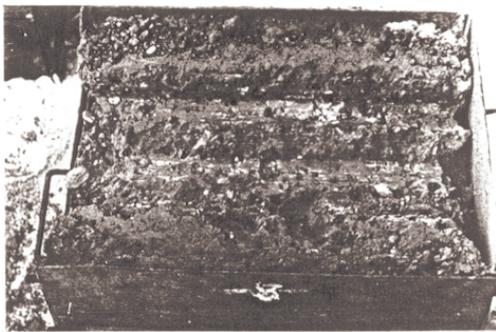


Рис. 4. Образец мерзлого грунта влажностью $\omega = 18,8\%$.

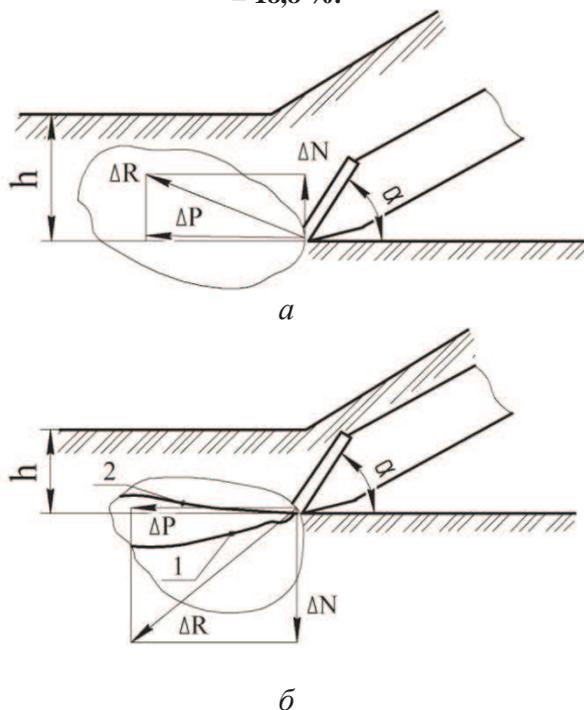


Рис. 5. Схема сил, действующих на включение при различном приложении нагрузок: *a* – ниже центра; *б* – выше центра.

В зависимости от точки приложения нагрузки сила ΔN направлена вверх, она выталкивает резец вниз, затягивая его

(рис. 5). При приложении нагрузки ниже середины ΔN затягивает резец в массив, в результате чего происходит отрыв включения, что на осциллограмме отмечается одним резким пиком.

Величину пиковой силы резания при отрыве включения с известным приближением можно определить по выражению [3]

$$P_n = (\sigma_p + \sigma_{сж}) \cdot \delta_{оп}; \quad (7)$$

где σ_p и $\sigma_{сж}$ – временное сопротивление растяжению и сжатию вмещающей среды, Н/см²; $\delta_{оп}$ – опорная поверхность, лежащая перпендикулярно вектору пиковой силы резания и ограниченная проекцией на нее контура включения, см². При приложении нагрузки выше середины включения сила ΔN выталкивает резец.

При этом происходит разрезание, дробление или вдавливание включения. Гравийно-галечниковые включения районов Сибири, как показал петрографический анализ, в основном состоят из хрупких горных пород вулканического происхождения. При встрече с резцом данные породы скалываются почти мгновенно по всему включению.

Однако, в зависимости от направления скола, максимальная пиковая нагрузка после первого удара некоторое время, соответствующее времени прохождения резца над разрушенным включением, может оставаться почти постоянной или иметь резкий спад. Резкое уменьшение нагрузки происходит, когда линия скола направлена вниз от точки ее приложения (рис. 6).

Когда линия скола направлена вверх от точки приложения удара, пиковая нагрузка мгновенно не падает, так как резец при дальнейшем движении испытывает большие сопротивления по задней грани. При этом первый пик, соответствующий максимальной нагрузке в момент удара о включение, может быть даже несколько меньше пиков, появляющихся при дальнейшем разрушении включения.

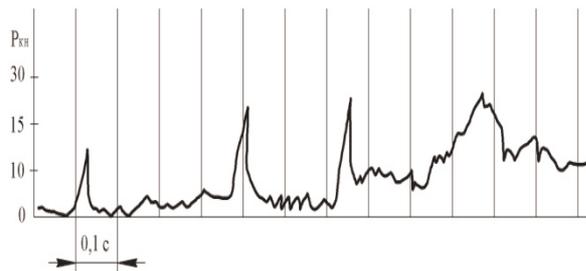


Рис. 6. Осциллограмма нагрузок, возникающих на резце при разрезании включения, когда линия скола направлена вниз от точки приложения нагрузок.

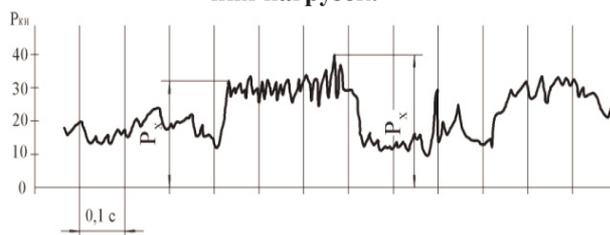


Рис. 7. Осциллограмма нагрузок, возникающих на резце при разрезании включения, когда линия скола направлена вверх от точки приложения нагрузки.

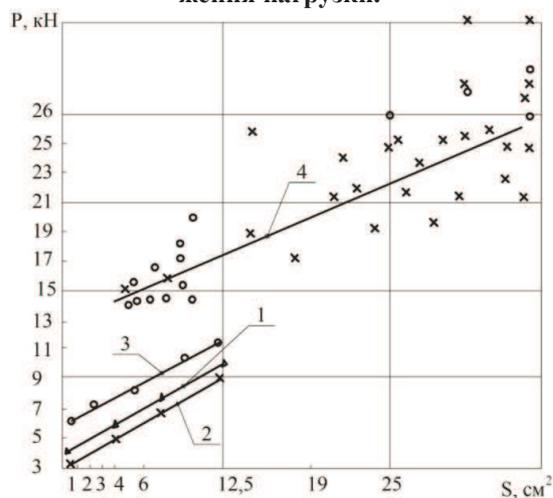


Рис. 8. Разрезанное включение жильного кварца.

На рис. 7 приведена осциллограмма, на которой отражены два момента разрезания включений: первое включение – гранит, второе – диорит. При разрезании гранита первая пиковая сила удара P'_z в 1,16 раза меньше максимальной силы P'_z , соответствующей сколу при дальнейшем разрушении включения.

На рис. 8 показано включение жильного кварца, у которого линия скола при первом ударе была направлена вверх. На следе от резца можно видеть мелкие сколы, соответствующие отделению элементов кварца при дальнейшем его разрушении резцом. В зависимости от встречи резца с включением их взаимодействия могут быть следующих видов [4]:

краевое разрезание, центральное разрезание, касание, вырыв, извлечение.

На рис. 9 показан образец с разрушенным включением размером 67 мм при центральном разрезании его резцом. Скорость резания при этом была равна 1,2 м/с, подача $h = 16$ мм.

На рис. 10 показаны максимальные включения, которые использовались при исследованиях. Наибольший размер включений достигал 115 мм.

В результате анализа опытных данных получены зависимости изменения усилия резания от размеров включений (рис. 11).

Сопоставление опытных данных показывает, что среднемаксимальные усилия при резании образцов, включения у которых были заложены стохастически, в 1,5–1,7 раза ниже усилий резания, возникающих при резании образцов с ориентированными включениями при одинаковых размерах включений. Это указывает на то, что часть включений при стохастическом их заложении или вырывается из грунта, или удаляется вместе с вмещающей средой, уменьшая общее усилие резания.



Рис. 9. Образец мерзлого грунта влажностью $\omega = 25,4$ %.

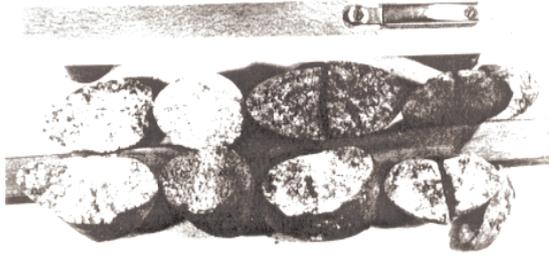


Рис. 10. Включения в образцах мерзлого грунта.

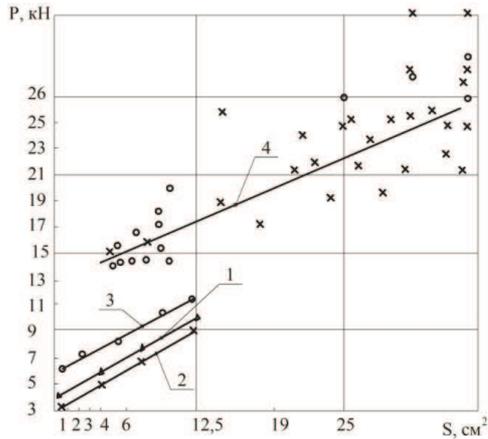


Рис. 11. Изменение усилия резания от размера включений.

Исследования показали, что большое влияние на изменения усилия резания оказывает процентное содержание в мерзлом грунте гравийно-галечниковых включений. Процентное содержание включений при исследовании изменялось от 10 до 90 %.

При этом соотношение процентного содержания отдельных фракций в единице веса грунта сохранялось постоянным.

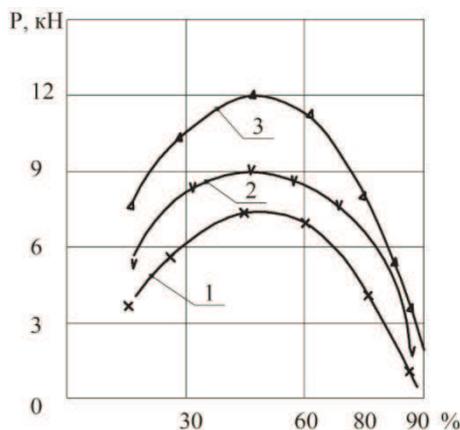


Рис. 12. Зависимость среднемаксимальной касательной составляющей

от процентного содержания включений.

Зависимости 1–3 соответствуют изменениям усилия от размеров включений, стохастически расположенных в образце, соответственно, для заблокированного резания среднего и крайнего резцов шириной 35 мм, установленных под углом 45°; толщина стружки составляла 13 мм.

Зависимость 4 отражает изменение усилия резания от размеров включений при ориентированном расположении их в образце при резании резцом шириной 35 мм, толщина стружки мерзлого грунта влажностью 18,0 % составляет 18 мм.

На рис. 12 показаны зависимости среднемаксимальной касательной составляющей усилия резания от процентного содержания включений. При увеличении процентного содержания включений и их размеров усилие резания возрастает. Однако это увеличение ограничено процентным содержанием связующей среды. При увеличении размеров включений уменьшается количество вмещающей среды в образце, что необходимо для создания прочной структурной связи.

Зависимости получены для мерзлых грунтов влажностью 19,7 %, прочностью 105 ударов по плотномеру ДорНИИ при резании резцом шириной 35 мм. Зависимость 1 соответствует центральным резцам при подаче 11 мм, зависимость 2 получена для крайних резцов при подаче 11 мм, зависимость 3 – при подаче 22 мм.

Анализ результатов обработки осциллограмм показал, что при увеличении процентного содержания включений от 10 до 45 % сопротивление резанию возрастает. При дальнейшем увеличении процентного содержания включений усилие резания заметно уменьшается, что указывает на невозможность оставшейся массе вмещающей среды создавать арочное соединение грунта с включениями, а при содержании включений 30 % структура образца представляет собой «набор» включений, слабо связанных между собой.

Коэффициент вариации при увеличении процентного содержания включений в образце от 10 до 70 % увеличивается (см. таблицу 1) от 0,36 до 0,68, а затем начинает убывать.

Изменение коэффициента вариации усилия резания объясняется тем, что при увеличении процентного содержания включений до 70 % и при достаточном количестве связующей среды среднее квадратичное отклонение σ_p , характеризующее общую степень рассеяния силы резания, увеличивается главным образом за счет взаимосвязи обоих компонентов.

При дальнейшем увеличении содержания включений до 65-70 %, когда связующей среды мало, главную роль в увеличении коэффициента вариации играют размеры отдельных включений, все еще связанных с грунтом. Начиная с содержания включений выше 70 %, связующая среда все меньше оказывает влияние на процесс резания. При 50 % включения связующая среда свободно раздвигается или разбрасывается резцом. Среднеквадратичное отклонение падает. Коэффициент вариации при этом зависит только от размеров включений.

Для получения обобщающей зависимости сопротивлений резанию мерзлого грунта от процентного содержания в нем гравийно-галечниковых включений экспериментальные данные представлены в виде графика на рис. 13. По оси ординат отложен коэффициент K_ξ , равный отношению среднемаксимальной величины касательной составляющей силы резания при i -м процентном содержании гравийно-галечниковых включений к среднемаксимальной силе резания при 45 % содержании включений, а по оси абсцисс – процентное содержание включений.

Из графика видим, что экспериментальные точки, полученные для разных условий резания, располагаются около одной общей кривой, которая описывается уравнением

$$K_\xi = 0,1033 + 0,03918 \cdot \xi - 0,00043 \cdot n^2, \quad (8)$$

где n – процентное содержание гравийно-галечниковых включений.

Таблица 1

Коэффициент вариации усилия резания

Процентное содержание, %	Коэффициент вариации
10	0,36
25	0,49
40	0,58
50	0,60
60	0,62
70	0,68
80	0,63
90	0,57

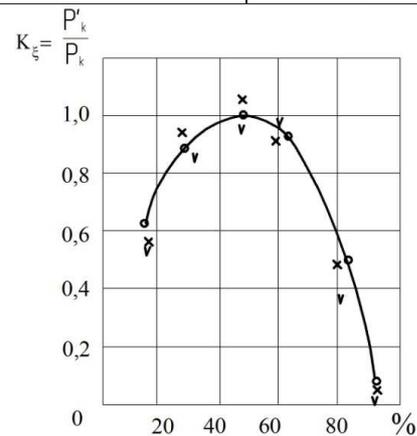


Рис. 13. Зависимость коэффициента вариации усилия от процентного содержания включений.

На основании проведенных исследований усилия резания мерзлого грунта с наиболее вероятным процентным содержанием гравийно-галечниковых включений резцами рабочих органов рекомендуется рассчитывать по формуле

$$P'_k = P_k \cdot K'_V \cdot K'_\alpha \cdot \mu, \quad (9)$$

а усилие заблокированного резания – по формуле

$$P_k = 10Ch^{1,05} (1,0 + 0,55b) 1,92, \text{ Н.} \quad (10)$$

Коэффициент влияния скорости резания: для средних резцов

$$K'_V = (0,9244 - 0,063V_p)(0,98 + 0,023 \frac{t-b}{h}); \quad (11)$$

для крайних резцов

$$K'_V = (0,9244 - 0,063V_p)(0,99 + 0,031 \frac{t-b}{h}). \quad (12)$$

Коэффициент влияния угла резания:

для средних резцов

$$K'_a = (0,456 + 0,068\alpha)(0,98 + 0,03\frac{t-b}{h}); \quad (13)$$

для крайних резцов

$$K'_a = (0,456 + 0,068\alpha)(1 + 0,033\frac{t-b}{h}). \quad (14)$$

Коэффициент трения мерзлого грунта по резцам рабочего органа:

для средних резцов

$$\mu = 0,516 + 0,2622(\frac{t-b}{h}); \quad (15)$$

для крайних резцов

$$\mu = 0,982 + 0,2113(\frac{t-b}{h}). \quad (16)$$

Изменение процентного содержания в грунте гравийно-галечниковых включений можно учитывать, используя коэффициент K_ξ .

Касательная составляющая усилия резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями резцами, установленными по ступенчато-шахматной схеме, существенно увеличивается от влажности грунта в пределах значений влажности от 5 до 18 %.

Касательная составляющая усилия резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями резцами, установленными по ступенчато-шахматной схеме, существенно уменьшается в зависимости от влажности в пределах ее значений от 18 до 28 %.

Увеличение ширины резцов траншейных экскаваторов, установленных по ступенчато-шахматной схеме, приводит к увеличению усилия резания при фиксированных значениях влажности в 2,3–2,5 раза.

Влияние процентного состава гравийно-галечниковых включений на усилие резания мерзлых грунтов и коэффициент вариации усилия резания имеет две ярко выраженные особенности:

– увеличение процентного состава гравийно-галечниковых включений в мерзлых грунтах, разрабатываемых траншейными экскаваторами, в пределах от 10 до 45 % приводит к значительному увеличению значений касательной составляющей силы резания и коэффициента вариации усилия;

– при последующем увеличении процентного содержания происходит их уменьшение; при этом интенсивность уменьшения значений усилия и коэффициента вариации выше, чем в первом случае.

Усилие резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями резцами, установленными по ступенчато-шахматной схеме, линейно зависит от прочности мерзлого грунта и толщины резания.

Литература

1. Траншейные экскаваторы / В. А. Румянцев [и др.]. М. : Машиностроение, 1980. 102 с.
2. Исследование стойкости режущего инструмента траншейных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов / В. П. Бондаренко [и др.] // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера : сб. науч. тр. / Краснояр. Промстройпроект. Красноярск, 1974. Вып. 30. С. 205–213.
3. Баловнев, В. И. Моделирование процесса взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. М. : Высш. шк., 1981. 335 с.
4. Трехкомпонентный динамометр / А. И. Берон [и др.] // Измерительная техника. 1960. № 10. С. 33–35.