

И.Г. Мартюченко, С.В. Иванов, А.Ю. Колесников, В.В. Иванов
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ
МЕРЗЛОТОРЫХЛИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ГРУНТОМ

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

В работе предлагается новое оборудование для разработки мерзлых грунтов в стесненных условиях строительства, осуществляющее безударное разрушение. Представлены результаты теоретических исследований процесса взаимодействия рабочих элементов с грунтовой средой. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить рациональные параметры рабочих органов мерзлоторыхлительного инструмента. Представлен анализ теоретических исследований.

Ключевые слова: мерзлый грунт, мерзлоторыхлительное оборудование, винтовой наконечник, рыхлящие элементы, стесненные условия.

Разработка мерзлых грунтов характеризуется большой энергоемкостью и трудоемкостью, поскольку мерзлый грунт представляет собой сложную, многокомпонентную нестабильную систему, обладающей высокой абразивностью и механической прочностью.

Но, помимо энергоемкости и трудоемкости процесса разрушения мерзлого грунта, проблемой является производство малообъемных зимних земляных работ в городских условиях. Близость инженерных сооружений к месту производства работ, малые размеры строительной площадки, рассредоточенность объектов и другие стесненные условия ограничивают использование существующего парка землеройных машин и иных методов разработки мерзлого грунта. Несмотря на значительную производительность и эффективность процесса разрушения грунта, использование их невозможно или экономически не целесообразно, поскольку они не удовлетворяют основным требованиям, каковыми являются свободная маневренность с осуществлением рабочего процесса и реализация рабочего процесса без динамических нагрузок на грунт.

В настоящее время для производства данного вида работ широко применяется навесное оборудование динамического действия, но динамические нагрузки негативно воздействуют как на инженерные сооружения, расположенные вблизи зоны работ, так и на металлоконструкцию оборудования, что приводит к неисправности оборудования.

Одним из перспективных устройств, совершающих механическое безударное разрушение, является мерзлоторыхлитель (рис.1), разработанный на кафедре СДМ СГТУ им. Гагарина Ю.А., в состав которого входят рыхлящие элементы с винтовыми наконечниками.

Силовое воздействие на разрабатываемую среду обеспечивается рыхлящими элементами конусной формы посредством внедрения винтовых наконечников. Винтовые наконечники выполняют тяговую функцию, развивая значительные усилия на задавливание клиньев при небольшой мощности привода. Принципиальным отличием от существующих конструкций является то, что комбинированный рабочий орган выполняет как тяговую, так и рыхлящую функцию. Тяговую функцию выполняют два винтовых наконечника, а рыхлящую функцию выполняют штанги переменного сечения, имеющие форму конуса. Такое конструктивное исполнение рабочих органов позволит исключить влияние на металлоконструкцию реактивного крутящего момента, снизить энергоемкость процесса разрушения, поскольку в рабочем процессе участвуют два рабочих органа вместо трех или четырех, как в существующих конструкциях. При этом анализ существующих исследований винтовых наконечников показал, что использование в оборудовании двух наконечников меньших размеров вместо одного позволит снизить крутящий момент на 30%, при этом сохраняя тяговую способность.

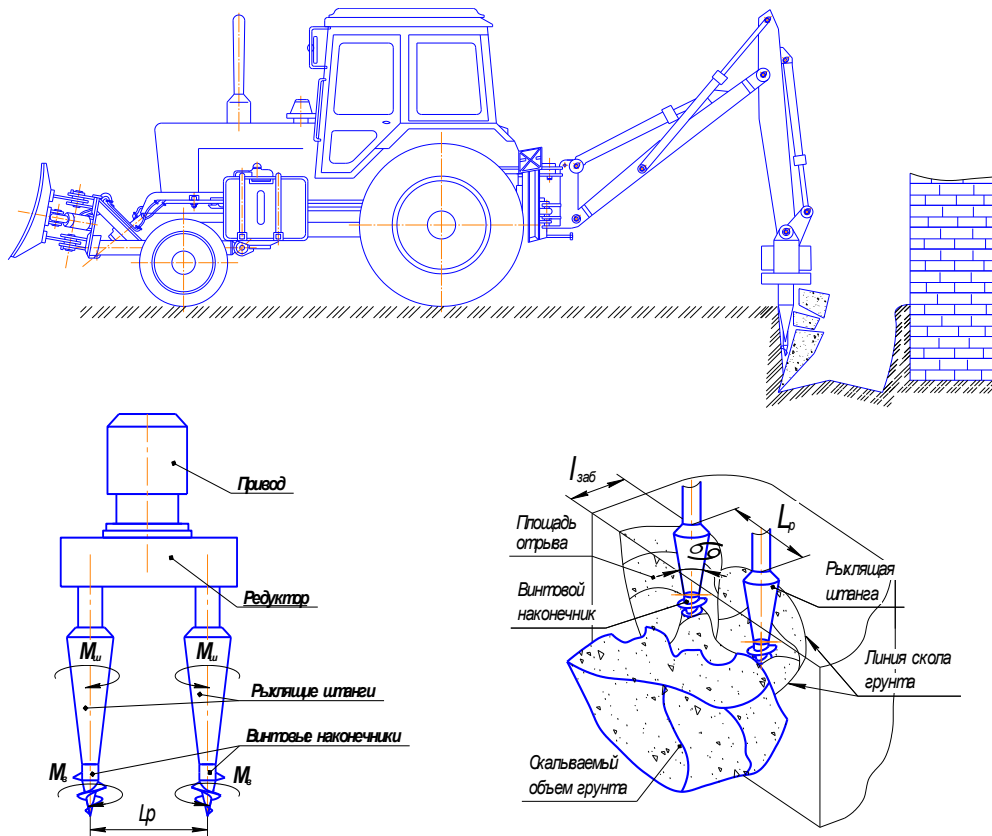


Рис. 1. Мерзлоторыхлительное оборудование

Для функциональной работы оборудования необходимо выполнение условия, при котором винтовые наконечники, заворачиваясь в грунт, обеспечивают способность погружения за собой рыхлящих элементов до достижения критической глубины, при которой происходит отрыв элемента грунта в сторону забоя.

Данное условие обеспечивается уравнением силового баланса между тяговой возможностью винтовых наконечников и силами сопротивления внедрению данных наконечников, а также силами внешней нагрузки, приложенными к винтовым наконечникам и обусловленными силами сопротивления грунта разрушению при внедрении рыхлящих элементов.

Условие силового баланса между рабочими элементами мерзлоторыхлительного оборудования определяется по следующей зависимости [5]:

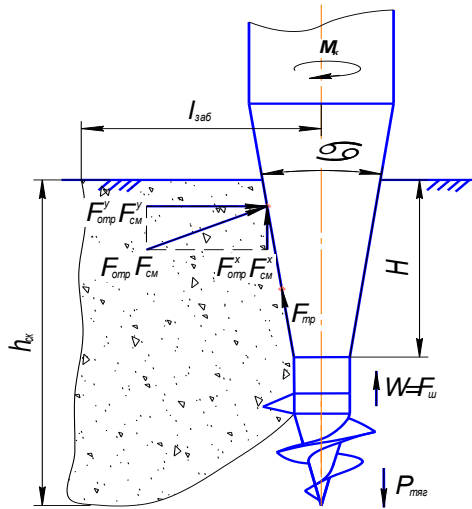
$$P_{\text{тяг}} \geq \sum P_i + W,$$

где: $P_{\text{тяг}}$ – тяговая возможность винтовых наконечников; W – силы внешней нагрузки, обусловленные силами сопротивления грунта разрушению от воздействия рыхлящих штанг $F_{\text{ш}}$; $\sum P_i$ – сумма сил сопротивления грунта внедрению винтового наконечника;

Силы внешней нагрузки, приложенные к винтовым наконечникам W , соответствуют силам сопротивления грунта разрушению $F_{\text{ш}}$ и определяются по зависимости (рис.2):

$$F_{\text{ш}} = |F_{\text{см}}|_y + |F_{\text{тр}}|_y + |F_{\text{отр}}|_y,$$

где: $F_{\text{ш}}$ – сила сопротивления грунта разрушению от воздействия рыхлящих элементов; $F_{\text{см}}$ – сила сопротивления грунта сжатию рыхлящими элементами; $F_{\text{тр}}$ – сила сопротивления грунта трению по поверхности рыхлящих элементов; $F_{\text{отр}}$ – сила сопротивления грунта отрыву в сторону открытой стенки забоя от воздействия рыхлящих элементов.



**Рис.2. Схема сил сопротивления грунта разрушению
Определение сил сопротивления грунта разрушению**

Внедрение рыхлящих элементов сопровождается деформацией грунта, приводящей к разрушению структурных связей в грунте. Данный процесс характеризуется возникновением больших давлений при малой площади приложения нагрузки, где зависимость между деформацией грунта и напряжением сжатия может быть описана зависимостью С.А. Бернштейна – М.Н. Летошнева [5]:

$$\sigma_{сж} = P_0 \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta_0}\right)^\mu,$$

где: $\frac{\Delta}{\Delta_0}$ – величина относительной деформации грунта; P_0 – удельное сопротивление грунта вдавливанию; μ – параметр, характеризующий возрастание сопротивления грунта сжатию с увеличением деформации.

Для удобства величину Δ_0 обычно принимают равной единице, тогда выражение примет вид $\sigma_{сж} = P_0 \cdot (\Delta)^\mu$.

Величина контактного напряжения смятия от воздействия рыхлящих элементов является функцией величины линейной деформации грунта. Тогда в соответствии с приведенной зависимостью величина элементарной силы сжатия грунта рыхлящим элементом будет:

$$dF_{см} = \sigma_{сж} \cdot dS = P_0 \cdot (\Delta)^\mu \cdot dS.$$

При погружении рыхлящего элемента возникнет деформация, Δ которая будет зависеть от глубины погружения и угла заострения α , а также угла внутреннего трения φ (рис.3).

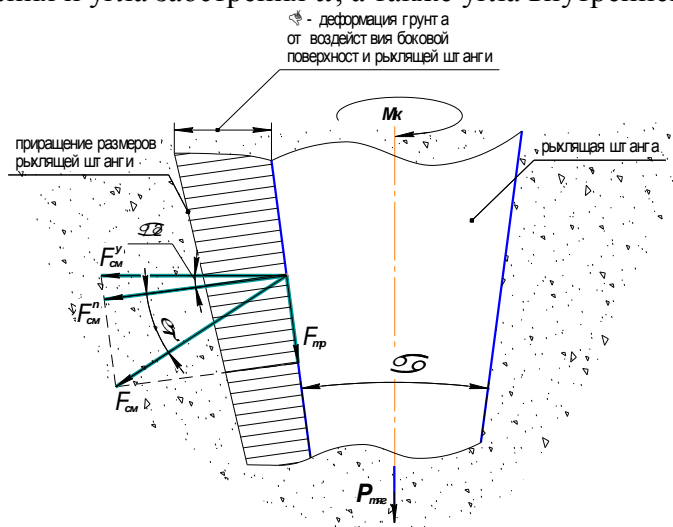


Рис. 3. Схема к определению сил сжатия грунта

Приращение величины линейной деформации, направленной элементарной площадкой по нормали к образующей поверхности рыхлящего элемента, будет равно:

$$\Delta = h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \varphi_1.$$

Площадь элементарной площадки dS , выражается из геометрических соображений (рис. 4):

$$dS = \frac{r \cdot dr \cdot d\varphi_1}{\sin \frac{\alpha}{2}}.$$

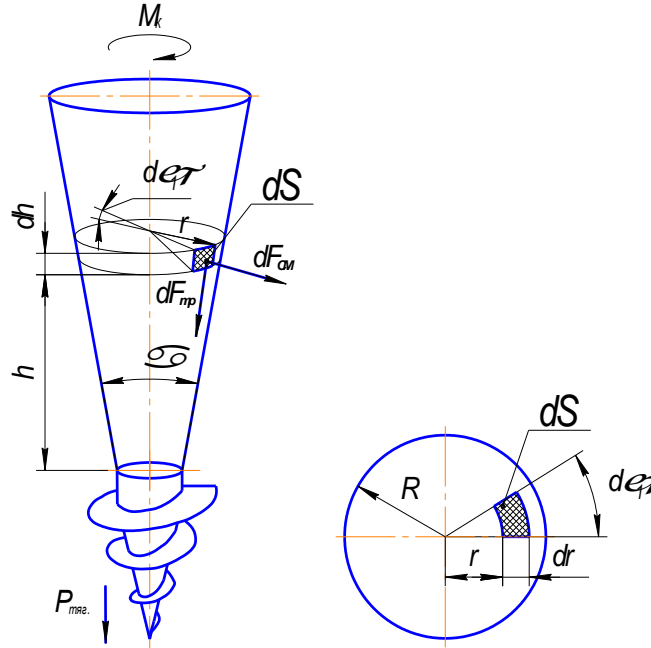


Рис. 4. Схема для определения площади элементарной площадки

Подставив найденные выражения в уравнение для определения элементарной силы смятия грунта, мы получаем уравнение:

$$dF_{\text{см}} = P_o \cdot \left(h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \varphi_1 \right)^\mu \cdot \frac{r \cdot dr \cdot d\varphi_1}{\sin \alpha}$$

В результате внедрения рыхлящих элементов силы трения будут отклонять векторы сил сжатия на величину угла трения грунта о материал рабочего органа φ , следовательно, результирующая сила сжатия грунта в контактной зоне взаимодействия поверхности рыхлящего элемента будет определяться как:

$$F_{\text{см}} = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} P_o \cdot \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \varphi} \right)^\mu \cdot \frac{r \cdot (h \cdot \varphi_1)^\mu}{\sin \frac{\alpha}{2}} dr d\varphi_1,$$

где: φ – угол трения грунта о материал рабочего органа.

С учетом ряда преобразований получена формула для определения сопротивления грунта сжатию от воздействия рыхлящего элемента конусной формы:

$$F_{\text{см}} = P_o \cdot \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \varphi} \right)^\mu \cdot \frac{(r_2 - r_1)^2 \cdot \left(2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{(r_2 - r_1)}{\tan \frac{\alpha}{2}} \right)^\mu}{(3 + \mu) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}},$$

где r_1, r_2 – верхнее и нижнее основание рыхлящего элемента.

Данная зависимость характеризует значение сил сжатия грунта в результате воздействия рыхлящего элемента, имеющего форму конуса, от геометрических параметров и свойств грунта.

При внедрении рыхлящих элементов на боковой поверхности усеченного конуса возникает сила трения, которая также оказывает влияние на процесс взаимодействия рабочих органов с грунтом. Сила сопротивления грунта трению направлена по касательной вдоль боковой поверхности усеченного конуса $F_{тр}$, она выражается как произведение нормальной силы сжатия грунта $F_{см}$ на коэффициент трения «сталь – мерзлый грунт» f_c , где коэффициент трения равен углу внутреннего трения, $f_c = tg\varphi$, следовательно:

$$F_{тр} = F_{см} \cdot f_c = F_{см} \cdot tg\varphi,$$

где f_c – коэффициент трения.

Основным параметром влияющим, на скальваемый объем грунта в сторону открытой стенки забоя является сила сопротивления грунта отрыву от воздействия рыхлящих элементов (рис.5,6). Отрыв происходит в момент достижения критической глубины внедрения за счет увеличения сечения рыхлящих элементов к основанию, создающего расклинивающий эффект и образование трещин скола, при этом мерзлый грунт оказывает сопротивление на воздействующую нагрузку, которое будет характеризоваться предельным значением прочности грунта $\tau_{пр}$ на разрыв. Силу сопротивления грунта отрыву можно определить выражением:

$$F_{отр} = \tau_{пр} \cdot S_{отр},$$

где $S_{отр}$ – площадь отрыва.

Определяющим значением в данном выражении при одинаковой прочности грунта является площадь отрыва, поскольку при увеличении расстояния от забоя и расстояния между рыхлящими элементами площадь отрыва увеличивается, соответственно возрастает и сопротивление грунта разрывным нагрузкам. Вследствие чего наступает момент, когда разрушение не происходит, поскольку силы сопротивления разрыву превышают расклинивающее усилие, создаваемое рыхлящими элементами.

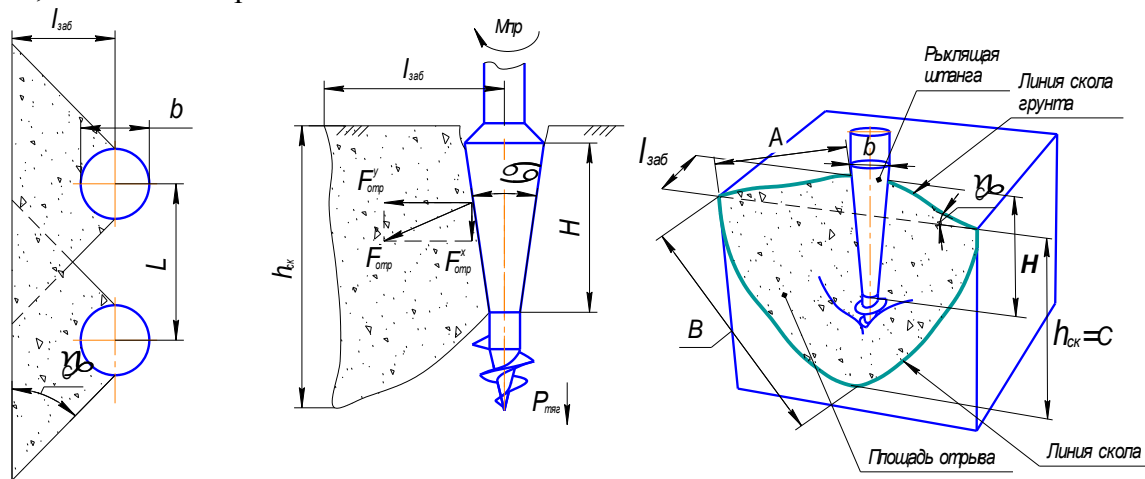


Рис.5. Схема к определению силы сопротивления грунта отрыву $F_{отр}$ от воздействия рыхлящих штанг в сторону стенки забоя

Площадь отрыва от воздействия одного рыхлящего элемента можно представить в виде треугольной пирамиды, где поверхностями отрыва являются две треугольные поверхности, равные между собой:

$$S_{отр} = 2S_{бок},$$

где: $S_{бок}$ – площадь треугольной боковой поверхности;

Площадь отрыва одной боковой поверхности трехгранной формы можно определить по трем сторонам согласно формуле Герона:

$$S_{\text{бок}} = \sqrt{p \cdot (p - A) \cdot (p - B) \cdot (p - C)}; \quad p = \frac{A+B+C}{2},$$

где: A – длина трещины скола в направлении стенки забоя; B – длина трещины скола в направлении глубины скола забоя; C – длина трещины скола соответствующая глубине скола $h_{\text{ск}}$; p – полупериметр.

С учетом изменения расстояния между рыхлящими элементами L_p и расстояния от стенки забоя, общая площадь отрыва грунта будет определяться путем вычета площади образованной в результате уменьшения данных расстояний (рис. 4) тогда зависимость сопротивления грунта разрыву примет вид:

$$F_{2\text{отр}} = \tau_{\text{пр}} \cdot \left[4 \cdot \sqrt{p \cdot \left(p - \frac{l_{\text{заб}}}{\sin \gamma_c} \right) \cdot \left[p - \sqrt{\left(\frac{l_{\text{заб}}}{\sin \gamma_c} \right)^2 + h_{\text{ск}}^2} - \left(2 \cdot \frac{l_{\text{заб}}}{\sin \gamma_c} \cdot h_{\text{ск}} \cdot \cos \delta_c \right) \right] \cdot (p - h_{\text{ск}})} \right] -$$

$$- \left[2 \cdot \sqrt{p_2 \cdot \left[p_2 - \frac{l_2}{\sin \gamma_c} \right] \cdot \left[p_2 - \sqrt{\left[\left(\frac{l_2}{\sin \gamma_c} \right)^2 + c_1^2} \right] - \left(2 \cdot \frac{l_2}{\sin \gamma_c} \cdot c_1 \cdot \cos \delta_2 \right) \right] \cdot [p_2 - c_1]} \right].$$

Полупериметр p равен:

$$p = \frac{\frac{l_{\text{заб}}}{\sin \gamma_c} + \left[\sqrt{\left| \frac{l_{\text{заб}}}{\sin \gamma_c} \right|^2 + h_{\text{ск}}^2} - \left| 2 \cdot \frac{l_{\text{заб}}}{\sin \gamma_c} \cdot h_{\text{ск}} \cdot \cos \left(\pi - \frac{\pi}{2} - \gamma_c \right) \right| \right] + h_{\text{ск}}}{2}.$$

Полупериметр p_2 равен:

$$p_2 = \frac{\frac{l_2}{\sin \gamma_c} + \sqrt{\left[\left(\frac{l_2}{\sin \gamma_c} \right)^2 + c_1^2 \right] - \left(2 \cdot \frac{l_2}{\sin \gamma_c} \cdot c_1 \cdot \cos \delta_2 \right) + c_1}{2},$$

где: $h_{\text{ск}}$ – глубина скола; $l_{\text{заб}}$ – расстояние от стенки забоя; γ_c – угол скола; δ_c – угол противолежащий длинны трещины скола; δ_2 – угол в основании пирамиды; l_2 – расстояние от стенки забоя до пересечения линий скола между рыхлящим элементом; l_1 – расстояние от рыхлящего элемента до пересечения линий скола между рыхлящими элементами; c_1 – глубина скола между рыхлящими элементами.

Данная зависимость отражает влияние расстояния между рыхлящими элементами L_p , расстояния от забоя $l_{\text{заб}}$, угла скола γ_c и глубины скола $h_{\text{ск}}$, на площадь отрыва и соответственно на объем скальваемого грунта.

Исходя из найденных сторон и площадей скальваемого элемента грунта, можно определить и объем отрываемого грунта (рис.6.) с учетом изменения расстояний $l_{\text{заб}}$, L_p , и угла γ_c :

$$V_{\text{отр}} = \left[2 \cdot \frac{1}{3} \cdot S_{1\text{осн}} \cdot h_{\text{ск}} \right] - \left[\frac{1}{3} \cdot S_{2\text{осн}} \cdot c_1 \right],$$

где: $S_{1\text{осн}}$ – общая площадь основания пирамиды скальваемого грунта; $S_{2\text{осн}}$ – изменяемая площадь основания пирамиды скальваемого грунта.

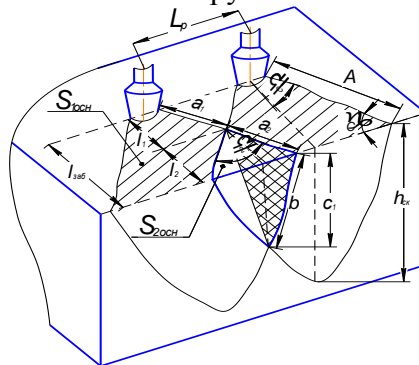


Рис. 6. Схема определения объема и площади отрыва от расстояния L_p

В процессе взаимодействия конусного рыхлящего элемента с грунтовой средой, он преодолевает силы сопротивления грунта сжатию телом рыхлящего элемента и силы трения по рабочей поверхности, тогда на основе полученных зависимостей величина крутящего момента сопротивления погружению рыхлящего элемента будет иметь вид:

$$M_1 = r_2 \cdot P_o \left[\left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \varphi} \right)^\mu \cdot \frac{(r_2 - r_1)^2 \cdot (2\pi^2 \cdot h)^\mu}{(3 + \mu) \sin \frac{\alpha}{2}} \cos \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \varphi} \right)^\mu \cdot \frac{(r_2 - r_1)^2 \cdot (2\pi^2 \cdot h)^\mu}{(3 + \mu) \sin \frac{\alpha}{2}} \operatorname{tg} \xi \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right].$$

Результаты исследований

Результаты анализа исследований показали, что использование в инструменте двух винтовых наконечников меньших размеров позволит снизить крутящий момент на 30%, при этом сохраняя тяговое усилие (рис. 7). Из зависимости распределения составляющих сил сопротивления грунта разрушению от угла заострения рыхлящего элемента α (рис. 8) следует, что увеличение угла заострения ведет к уменьшению данных сил, при этом сопротивление грунта отрыву не зависит от угла заострения и является величиной постоянной. Минимальные значения сил достигаются при угле заострения $\alpha = 25 \dots 30^\circ$.

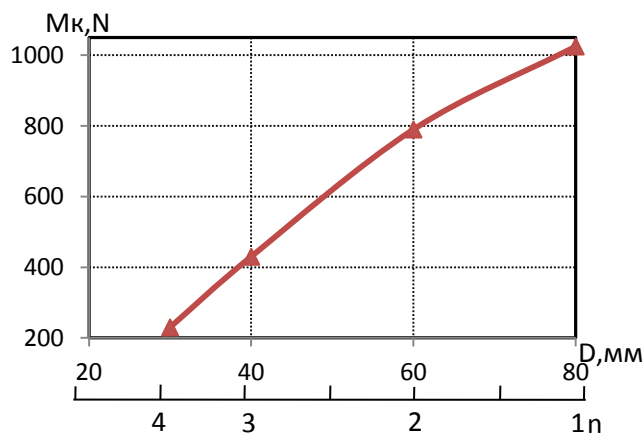


Рис. 7. Влияние количества винтовых наконечников на крутящий момент

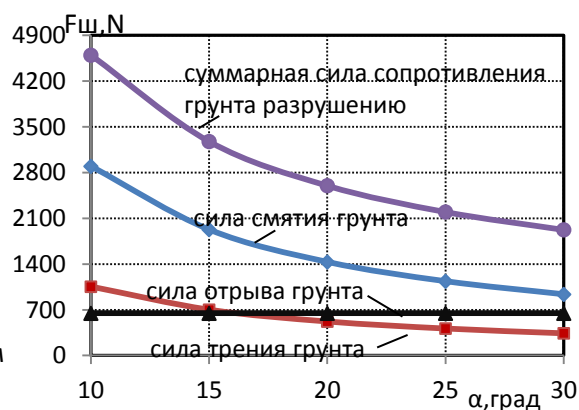


Рис. 8. Влияние угла заострения рыхлящего элемента, на силы $F_{ш}$.

На графиках (рис. 9) представлены зависимости сопоставления величин крутящего момента сопротивления внедрению рыхлящих элементов, имеющих форму конуса и клина от угла заострения, а также силы сопротивления грунта разрушению от воздействия рыхлящих элементов, имеющих данную форму.

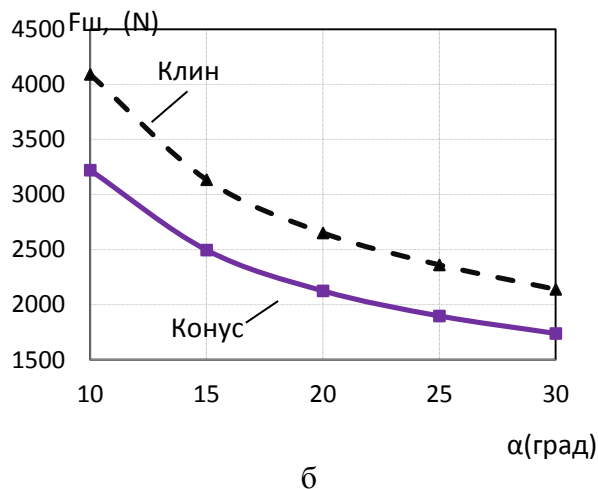
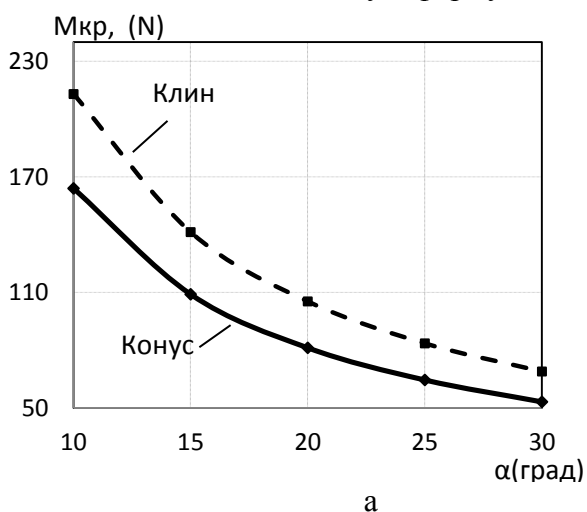


Рис. 9. а – влияние формы рыхлящих элементов на крутящий момент; б – влияние формы рыхлящих элементов на силу сопротивления грунта разрушению.

Из анализа зависимостей следует, что при использовании рыхлящих элементов, имеющих форму конуса, сила сопротивления грунта разрушению на 25% меньше, а крутящий момент на 20% меньше.

Библиографический список

1. **Иванов, С.В.** Выбор рациональных размерно-геометрических параметров мерзлоторыхлительного оборудования [Текст] / И.Г. Мартюченко, С.В. Иванов // Строительные и дорожные машины. 2015. №7. С.49-51.
2. **Иванов, С.В.** Определение эффективности использования нескольких винтовых рабочих органов в мерзлоторыхлительном оборудовании [Текст] / И.Г. Мартюченко, С.В. Иванов // Научное обозрение. 2015. №15. С.69-75.
3. Пат. 118983 Российская Федерация, МПК E02F 5/30. Устройство для разработки мерзлого грунта / И.Г. Мартюченко, С.В. Иванов.; заявитель и патентообладатель СГТУ имени Гагарина Ю.А. - № 2012109312/03; заявл. 12.03.2012; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22.- 5с.:ил.
4. **Зеленин, А.Н.** Основы разрушения грунтов механическими способами [Текст] / А.Н. Зеленин. – изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Москва, 1968. – 376с.
5. **Мартюченко, И.Г.** Методы снижения энергозатрат при разработке мерзлых и прочных грунтов / И.Г. Мартюченко. – Саратов: СГТУ, 2004. – 150 с.