

УДК 622.23.05

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ВИНТОВЫМ БУРОМ

Мартюченко Игорь Гаврилович¹,
rosdortex_sstu@rambler.ru

Зенин Максим Иванович¹,
zenin-1995@mail.ru

Колесников Алексей Юрьевич¹,
kolesnikovaleksei@yandex.ru

Бойков Евгений Васильевич¹,
boykov_e@mail.ru

¹ Саратовский технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания нового бурового инструмента для бурения мерзлого грунта в сложных условиях. Это направление исследований является важным и актуальным для обеспечения образования скважин на мерзлых песках, так как винтовой буровой инструмент осуществляет деформацию отрыва мерзлого грунта, что позволяет бурить труднобуримые грунты, а именно мерзлые пески.

Цель: исследовать процесс взаимодействия разрушающей части винтового бура с мерзлым грунтом и определить рациональные значения геометрических параметров винтовой лопасти при достижении наименьшего значения усилия отрыва грунта и наибольшего значения производительности процесса бурения.

Объекты: взаимодействие разрушающей части винтовой лопасти винтового бура с мерзлым грунтом.

Методы: построение графиков зависимостей факторов, показывающих энергоёмкость процесса бурения, от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение, и от шага винтовой лопасти на втором участке разрушающей части винтового бура; анализ полученных результатов теоретических исследований усилия отрыва грунта и производительности процесса бурения грунта от геометрических параметров винтовой лопасти бурового инструмента на мерзлых грунтах.

Результаты. Исследовалось влияние геометрических параметров винтового бура на процесс образования скважины. Были получены зависимости усилий, затрачиваемых на отрыв грунта, построены графики. Была определена прямая зависимость производительности процесса бурения от угла поворота радиуса винтовой лопасти и от шага винтовой лопасти на втором участке разрушающей части винтового бура. По результатам теоретических исследований проведен анализ полученных зависимостей и найдена область рациональных значений геометрических параметров винтовой лопасти винтового бура на мерзлых грунтах.

Ключевые слова:

Бурение скважин, мерзлые грунты, винтовой бур, разрушение грунта, образование скважин, буровой инструмент.

Введение

На территории Сибири, где в большей степени преобладает мерзлый грунт, ведутся строительные работы с применением бурового инструмента, а также поисково-разведочные работы и добыча полезных ископаемых. Мерзлый грунт по глубине залегания имеет структуру слоев, состоящих из различных типов грунтов – от мерзлого песка до талых пород. Такая структура мерзлых грунтов приводит к усложнению производства буровых работ и к повышению требований к буровому инструменту. Особую проблему представляют слои мерзлого песка, который по своим свойствам резко отличается от других типов мерзлых грунтов. К ним относятся:

- высокая механическая прочность, сопоставимая с прочностью бетона, что приводит к повышенным энергозатратам и при определенных условиях даже к выходу бурового инструмента из строя;
- высокая абразивность, которая затрудняет процесс бурения и оказывает разрушающее действие

на рабочую поверхность бурового инструмента [1–8].

Существующие буровые инструменты, используемые на мерзлых грунтах, например, лопастные, шарошечные или режуще-шарошечные, не всегда способны эффективно работать на тех или иных категориях грунтов [9–13].

Механическая прочность мерзлых грунтов зависит от вида деформации. Относительное соотношение удельного сопротивления мерзлого грунта различным видам деформации показано в таблице. Наиболее энергоёмким видом деформации является вдавливание, а менее энергоёмким – разрыв [14–19].

Повышение эффективности буровых инструментов направлено на осуществление разрушения грунта деформацией сдвига или разрыва [20–27].

Деформацию сдвига и отрыва мерзлого грунта при образовании скважин реализует винтовой бур [27].

Винтовой буровой инструмент состоит из сердечника с размещенной на нем винтовой лопастью, которая состоит из двух частей: заходной и разрушающей [28].

Таблица. Относительные соотношения удельного сопротивления мерзлого грунта различным видам деформации
Table. Relative ratios of the specific resistance of frozen soil to various types of deformation

Характер деформации Deformation nature	Разрыв Breaking	Сжатие Compression	Сдвиг Shift	Изгиб Bending	Резание Cutting	Вдавливание Indentation
Среднее значение относительного показателя Average value of the relative indicator	1	3	1,7	2	7	21

Заходная часть бура необходима для создания тяговой способности в процессе бурения и осуществления его погружения без приложения осевого задавливающего усилия.

Разрушающая часть состоит из винтовой лопасти с переменными геометрическими параметрами и представляет собой два участка. На первом участке винтовая лопасть бурового инструмента имеет постоянный шаг и переменный изменяемый радиус на угол (ψ). На втором участке винтовая лопасть имеет постоянный радиус и увеличивающийся в два раза шаг, при этом изменяется угол наклона верхней образующей поверхности винтовой лопасти к оси вращения – от острого до прямого угла [29, 30].

Процесс разрушения мерзлого грунта винтовым буром осуществляется следующим образом. За счет значительного вылета винтовой лопасти, вследствие увеличения радиуса, и изменения угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения, относительно последнего витка заходной

части лопасти, происходит разрушение грунта деформацией отрыва и сдвига. Вследствие увеличения радиуса винтовая лопасть бура внедряется в массив мерзлого грунта, работая как клиновидный инструмент, тем самым осуществляется расклинивающее усилие, которое приводит к появлению трещины в сторону забоя за счет формирования силы отрыва грунта P_3 . В результате действия первого участка винтовой лопасти бура протекает отрыв и сдвиг грунта (рис. 1). Открытую поверхность и окончательное формирование скважины осуществляется вторым участком винтовой лопасти бурового инструмента.

Новая геометрическая форма бурового инструмента реализует деформации сдвига и отрыва мерзлого грунта за счет расклинивающего усилия винтовой лопасти бура. Это позволяет бурить грунты, обладающие высокой прочностью, большим сопротивлением резанию и хрупкостью. К таким грунтам, в первую очередь, относится мерзлый песок, бурение которого представляет наибольшую трудность при производстве буровых работ.

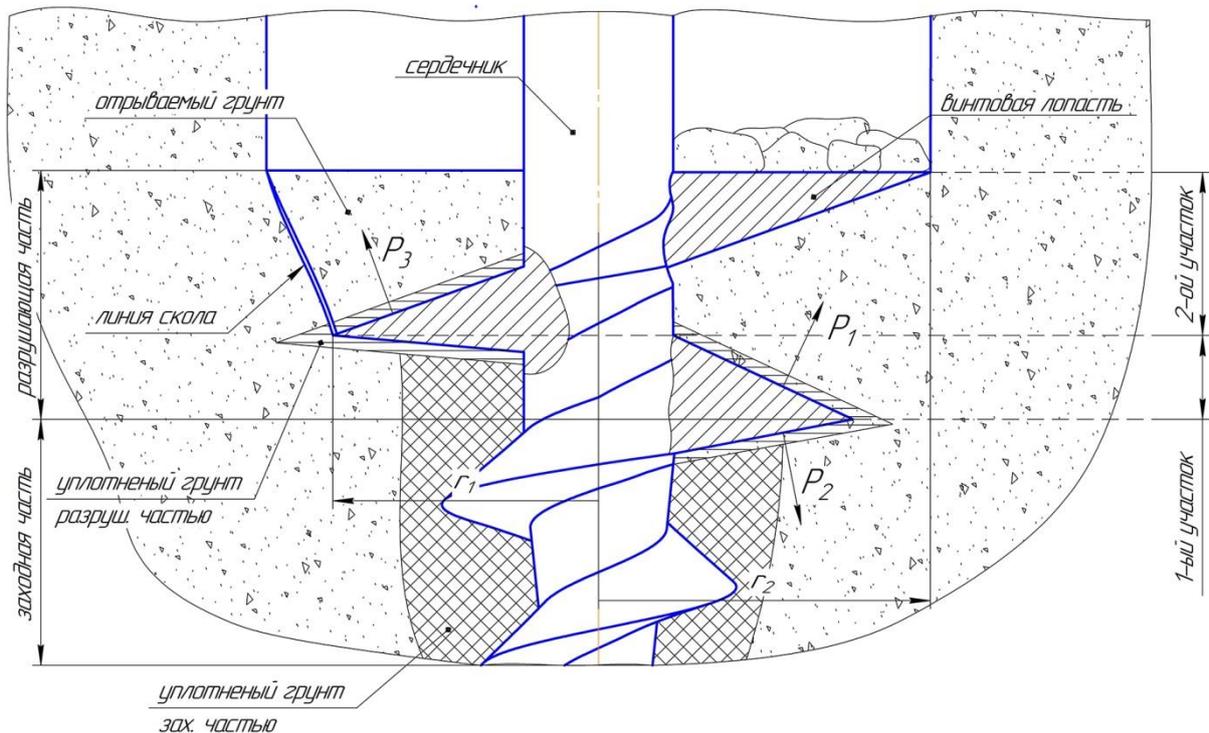


Рис. 1. Схема для определения результирующего усилия
Fig. 1. Scheme for determining the resulting force

Общий анализ существующих исследований процесса взаимодействия бурового инструмента с мерзлым грунтом показал, что исследований процесса бурения, реализующего деформации отрыва и сдвига грунта, недостаточно для создания нового типа бурового инструмента.

В связи с этим были проведены теоретические исследования винтового бура, отражающие процесс взаимодействия винтовой лопасти разрушающей части бурового инструмента с мерзлым грунтом.

Методы и материалы

Целью теоретических исследований являлось исследование процесса взаимодействия разрушающей части винтового бура с мерзлым грунтом и определение рациональных значений геометрических параметров винтовой лопасти при достижении наименьшего значения усилия отрыва грунта и наибольшего значения производительности процесса бурения.

Исследуемыми геометрическими параметрами винтовой лопасти являлись следующие геометрические параметры:

- угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение;
- шаг винтовой лопасти на втором участке.

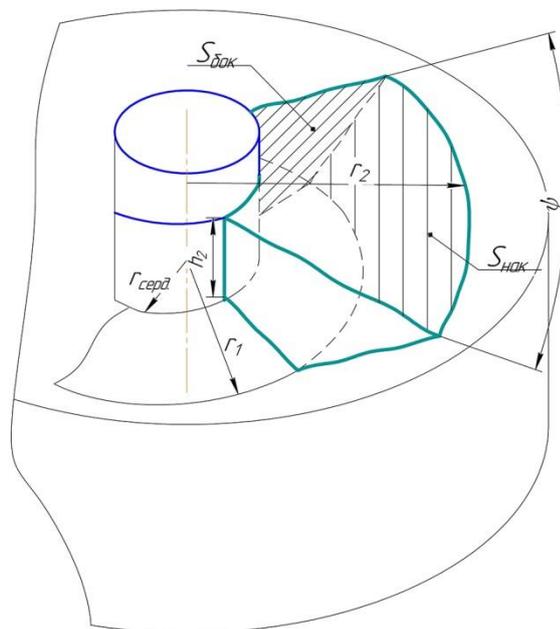
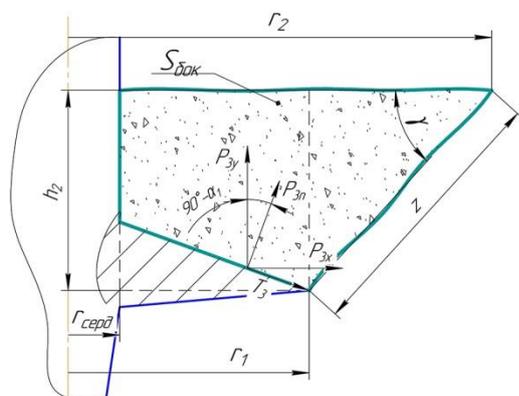


Рис. 2. Схема для определения необходимого усилия на отрыв грунта

Fig. 2. Scheme for determining the required effort to lift the soil

Площадь отрываемого грунта находится по следующей формуле:

$$S_{отр} = S_{бок} + S_{нак}, \quad (2)$$

где $S_{бок}$ – площадь боковой поверхности отрываемого грунта, m^2 ; $S_{нак}$ – площадь наклонной поверхности отрываемого грунта, m^2 .

Площадь боковой поверхности грунта, отрываемого винтовым буровым инструментом, примет следующий вид:

$$S_{бок} = \frac{h_2 \left((r_2 - r_{серд}) + (r_1 - r_{серд}) \right)}{2} - \frac{h_2 (r_1 - r_{серд})}{2} = \frac{h_2 (r_2 - r_{серд})}{2}, \quad (3)$$

где h_2 – шаг винтовой линии на втором участке винтового бурового инструмента; r_2 – радиус винтовой лопасти в конце второго участка при работе разрушающей части винтового бурового инструмента; $r_{серд}$ – радиус сердечника на разрушающей части

Результаты и обсуждения

На поверхности винтовой лопасти действует сила, стремящаяся оторвать грунтовой массив (рис. 2). Величина вертикальной составляющей силы отрыва грунта определяется по следующему уравнению:

$$P_{3x} = P_{3n} \cdot \cos(\alpha_1) = \tau_{пр} \cdot S_{отр} \cdot \cos(\alpha_1), \quad (1)$$

где $\tau_{пр}$ – предельное значение прочности мерзлого грунта, Па; α_1 – угол наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти первого участка к плоскости, перпендикулярной оси вращения, град; $S_{отр}$ – площадь грунта, отрываемого винтовым буром, m^2 ; P_{3n} – результирующая сила отрыва грунта, возникающая на верхней поверхности винтовой лопасти первого участка бурового инструмента, Н.

винтового бурового инструмента; r_1 – радиус винтовой лопасти в конце первого участка при работе разрушающей части винтового бурового инструмента.

Наклонная поверхность грунта, отрываемого винтовым буровым инструментом, представляет коническую поверхность, которая образована вдоль кромки винтовой лопасти, заключённую между винтовой лопастью первого и второго участков.

Площадь наклонной поверхности скола грунта винтовым буровым инструментом в конечном виде будет следующей:

$$S_{нак} = \frac{\pi \psi_1 (r_1 + r_2)}{180^\circ \cdot 2} \sqrt{z^2 - \left[\frac{\left(\frac{\pi \psi_1 (r_2 - r_1)}{180^\circ} \right)^2}{2 \left(\frac{\pi \psi_1 (r_2 - r_1)}{180^\circ} \right)} \right]} + \frac{\left(\frac{\pi \psi_1}{180^\circ} \right)^2 (r_2^2 \operatorname{tg}(\omega_2) - r_1^2 \operatorname{tg}(\omega_1))}{2}, \quad (4)$$

где ψ_1 – угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение, на первом участке; z – длина скола грунта; ω_2 – угол подъема средней винтовой линии верхней поверхности винтовой лопасти второго участка; ω_1 – угол подъема средней винтовой линии верхней поверхности винтовой лопасти первого участка.

С учетом полученных зависимостей (1)–(4) площадь отрываемого грунта примет следующий вид:

$$S_{\text{отр}} = \left(\frac{h_2(r_2 - r_{\text{серд}})}{2} \right) + \frac{\pi\psi(r_1 + r_2)}{180^\circ \cdot 2} \sqrt{z^2 - \left(\frac{\left(\frac{\pi\psi(r_2 - r_1)}{180^\circ} \right)^2}{2 \left(\frac{\pi\psi(r_2 - r_1)}{180^\circ} \right)} \right)^2} + \frac{\left(\frac{\pi\psi}{180^\circ} \right)^2 (r_2^2 \operatorname{tg}(\omega_2) - r_1^2 \operatorname{tg}(\omega_1))}{2}. \quad (5)$$

Таким образом, величина горизонтальной составляющей результирующей силы отрыва грунта с учетом (5) будет:

$$P_{3x} = \tau_{\text{пр}} \left[\left(\frac{h_2(r_2 - r_{\text{серд}})}{2} \right) + \frac{\pi\psi(r_1 + r_2)}{180^\circ \cdot 2} \cos(\alpha_1) \times \sqrt{z^2 - \left(\frac{\left(\frac{\pi\psi(r_2 - r_1)}{180^\circ} \right)^2}{2 \left(\frac{\pi\psi(r_2 - r_1)}{180^\circ} \right)} \right)^2} + \frac{\left(\frac{\pi\psi}{180^\circ} \right)^2 (r_2^2 \operatorname{tg}(\omega_2) - r_1^2 \operatorname{tg}(\omega_1))}{2} \right]. \quad (6)$$

Полученная зависимость (6) отражает влияние геометрических параметров винтовой лопасти бура, таких как угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение, и шаг винтовой лопасти на втором участке, а также физико-механические свойства грунта, на вертикальную составляющую силы отрыва грунта.

Важным критерием для оценки эффективности процесса бурения мерзлого грунта винтовым буром является его производительность.

Производительность винтового бура будет зависеть от объема грунта, отрываемого лопастью при повороте его на один оборот, и от частоты вращения винтового бура. Таким образом, часовая производительность процесса бурения мерзлого грунта винтовым буром примет следующий вид (7):

$$\Pi = V_{\text{гр}} \cdot n \cdot k_{\text{бук}} \cdot 60, \quad (7)$$

где $V_{\text{гр}}$ – объем разрушаемого мерзлого грунта за один оборот винтовой лопасти бурового инструмента, м³; n – частота вращения винтового бурового ин-

струмента; $k_{\text{бук}}$ – коэффициент пробуксовки задней части винтового бура.

Объем отрываемого грунта, который находится между витками винтовой лопасти разрушающей части винтового бура, определяется следующим выражением:

$$V_{\text{гр}} = V_I + V_{II}, \quad (8)$$

где V_I – объем мерзлого грунта, разрушаемого первым участком разрушающей части в процессе работы винтового бура, м³; V_{II} – объем мерзлого грунта, разрушаемого вторым участком разрушающей части в процессе работы винтового бура, м³.

Объем грунта, разрушаемого первым участком разрушающей части бура в процессе образования скважины, можно представить в следующем виде:

$$V_I = \frac{1}{3} \cdot S_1 \cdot H_1 + \frac{1}{3} \cdot S_2 \cdot H_2, \quad (9)$$

где S_1 – площадь основания грунта, отрываемого первым участком разрушающей части винтового бура, м²; H_1 – высота грунта, отрываемого первым участком разрушающей части винтового бура, м; S_2 – площадь основания грунта, отрываемого вторым участком разрушающей части винтового бура, м²; H_2 – высота грунта, отрываемого вторым участком разрушающей части винтового бура, м.

После ряда преобразований формула объема грунта, отрываемого первым участком, примет вид:

$$V_I = \frac{1.5h_1}{3} \left(\frac{\pi \cdot \psi_1}{180^\circ} \cdot (r_1^2 - r_{\text{серд}}^2) \right), \quad (10)$$

где h_1 – шаг винтовой линии на первом участке.

Объем грунта, располагающегося на втором участке, при работе разрушающей части винтовой лопасти зависит от геометрических параметров винтового бура имеет следующий вид:

$$V_{II} = \frac{1.5h_2}{3} \left(\frac{\pi \cdot \psi_2}{180^\circ} \cdot (r_2^2 - r_{\text{серд}}^2) \right). \quad (11)$$

С учетом формул (8), (10), (11) уравнение (9) примет следующий вид:

$$V_{\text{гр}} = \frac{1.5h_1}{3} \left(\frac{\pi\psi_1}{180^\circ} (r_1^2 - r_{\text{серд}}^2) \right) + \frac{1.5h_2}{3} \left(\frac{\pi\psi_2}{180^\circ} (r_2^2 - r_{\text{серд}}^2) \right). \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что объем грунта, разрушенный винтовой лопастью бура, зависит только от геометрических параметров винтового бура.

В результате проведенных преобразований была получена формула производительности винтового бура, которая в конечном виде имеет вид:

$$\Pi = \left[\frac{1.5h_1}{3} \left(\frac{\pi\psi_1}{180^\circ} (r_1^2 - r_{\text{серд}}^2) \right) + \frac{1.5h_2}{3} \left(\frac{\pi\psi_2}{180^\circ} (r_2^2 - r_{\text{серд}}^2) \right) \right] n k_{\text{бук}} \cdot 60. \quad (13)$$

Полученная зависимость (13) описывает влияние геометрических параметров винтовой лопасти бура, а именно шага и угла поворота радиуса винтовой лопа-

сти, при котором происходит его приращение, на величину производительности процесса бурения мерзлого грунта.

При проведении теоретических исследований были установлены зависимости величин усилия отрыва грунта и производительности процесса бурения от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопа-

сти. А также получены зависимости усилия отрыва грунта и производительности процесса бурения от шага винтовой лопасти на втором участке.

Зависимости усилия отрыва грунта и производительности процесса бурения от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти, представлены на рис. 3.

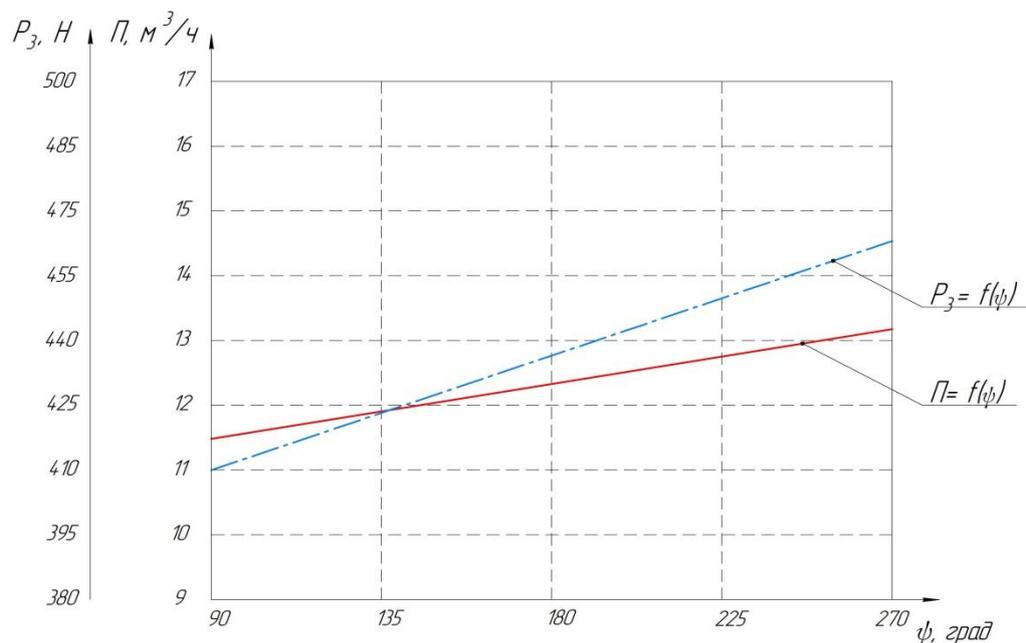


Рис. 3 График зависимости усилия отрыва грунта и производительности процесса бурения от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти

Fig. 3. Graph of the dependence of soil separation force and drilling productivity on radius rotation angle of the helical blade, at which the radius of the helical blade is incremented

На рис. 3 видно, что при увеличении значения угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти, величина усилия отрыва грунта и величина производительности процесса бурения возрастают. Наибольшее значение производительности наблюдалось при значении угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти равное 270°, что являлось наиболее эффективным при работе винтового бура. Наименьшее значение величины усилия отрыва грунта достигалось при значении угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти равное 90°, что являлось наиболее эффективным. Таким образом, рациональным значением угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти с учетом значений величины усилия отрыва грунта и величины производительности процесса бурения, являлось значение равное 135°.

Зависимости усилия отрыва грунта и производительности процесса бурения от шага винтовой лопасти на втором участке представлены на рис. 4.

На рис. 4 видно, что при увеличении значения шага винтовой лопасти на втором участке величина усилия отрыва грунта и величина производительности процесса

бурения возрастают. Наибольшее значение производительности наблюдалось при значении шага винтовой лопасти на втором участке 30 мм, что являлось наиболее эффективным при работе винтового бура. Наименьшее значение величины усилия отрыва грунта достигалось при значении шага винтовой лопасти на втором участке 14 мм, что являлось наиболее эффективным. Таким образом, рациональным значением шага винтовой лопасти на втором участке с учетом значений величины усилия отрыва грунта и величины производительности процесса бурения являлось значение 24 мм.

Из анализа полученных зависимостей следовало, что оптимальными значениями исследуемых геометрических параметров винтовой лопасти бурового инструмента являлись следующие: угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти, имеет значение 135°, а шаг винтовой лопасти на втором участке имеет значение 24 мм.

Оценка полученных результатов исследований позволила получить рациональные значения геометрических параметров винтовой лопасти бурового инструмента с учетом значений величины усилия отрыва грунта и величины производительности процесса бурения, при которых достигалась наибольшая эффективность.

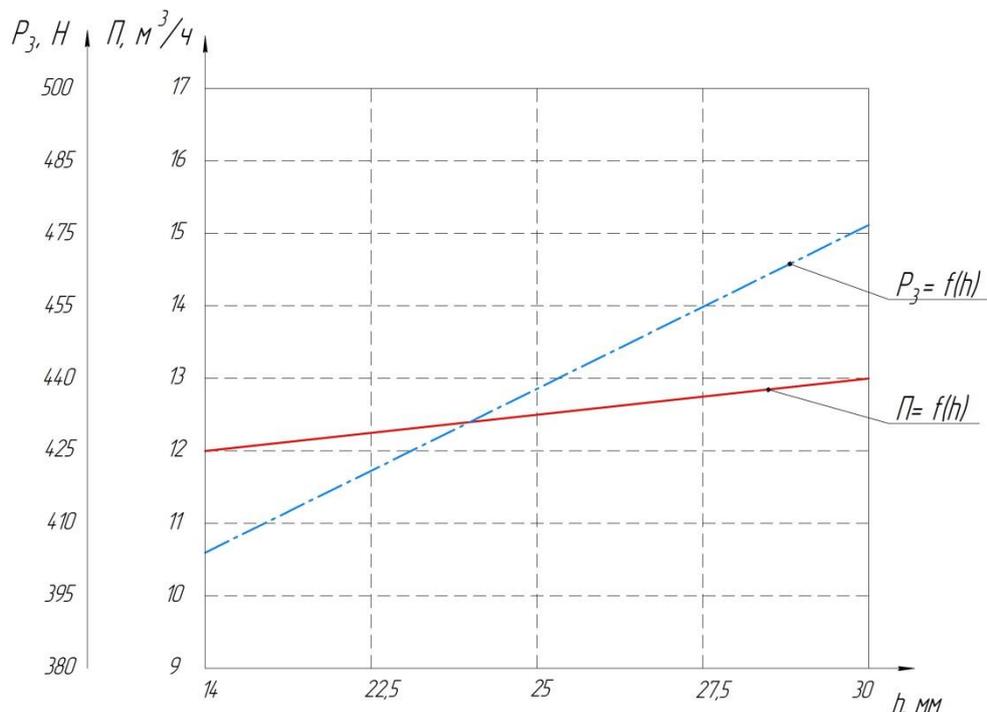


Рис. 4. График зависимости усилия отрыва грунта и производительности процесса бурения от шага винтовой лопасти на втором участке

Fig. 4. Graph of the dependence of soil separation force and drilling productivity on the pitch of the helical blade in the second section

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить рациональные значения геометрических параметров винтовой лопасти бурового инструмента. Угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит приращение радиуса винтовой лопасти, имеет

значение 135° , а шаг винтовой лопасти на втором участке имеет значение 24 мм. Такие значения геометрических параметров позволят достичь наименьшего значения усилия отрыва грунта и наибольшего значения производительности процесса бурения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lev V.E., Lev V.E., Izzy M.K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone // *Polar Research*. – 2019. – V. 38. – P. 128–135.
- Resistivity model of frozen soil and high-density resistivity method for exploration discontinuous permafrost / W. Shan, Z. Hu, Y. Guo, C. Zhang, Y. Liu // *Electrical Resistivity and Conductivity*. – 2017. – V. 23. – P. 23–52.
- Experimental study of the drilling process in debris-rich ice / P. Cao, C. Yang, Y. Chen, B. Chen, P. Talalay // *Cold Regions Science and Technology*. – 2015. – V. 120. – P. 138–144.
- Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia // *Polarforschung*. – 2012. – V. 81. – P. 151–153.
- Arenson L.U., Springman S.M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0°C // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2005. – V. 42. – P. 431–442.
- О влиянии режима нагружения на механические свойства мерзлых грунтов / Д.С. Герасимов, Н.Ю. Андреева, С.А. Полуков, В.П. Овчинников, П.В. Овчинников // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. – С. 73–77.
- Yang Z. J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate // *Cold regions science and technology*. – 2015. – V. 113. – P. 12–19.
- Aksenov V.I., Kalbergenov R.G., Leonov A.R. Strength characteristics of frozen saline soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2003. – V. 40. – P. 55–59.
- Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil // *Cold regions science and technology*. – 2010. – V. 64. – № 1. – P. 39–45.
- Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils / G. Zhou, K. Hu, X. Zhao, J. Wang, H. Liang, G. Lu // *Cold Regions Science and Technology*. – 2015. – V. 113. – P. 81–90.
- Тимофеев Н.Г., Жирков А.Н. Концепция разработки инновационного породоразрушающего инструмента для бурения скважин в условиях криолитозоны // *Евразийский союз ученых*. – 2015. – № 4. – С. 151–154.
- Talalay P.G. Introduction to ice drilling technology // *Mechanical Ice Drilling Technology*. – 2016. – V. 42. – P. 1–8.
- Ивкин В.С., Алашеев М.О. Влияние физико-механических свойств грунтов на работу машин для земляных работ // *Вестник УлГТУ*. – 2015. – № 3. – С. 62–67.
- Ивкин В.С., Вунберова Н.П. Малообъемные, рассредоточенные зимние земляные работы в стесненных условиях строительства // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. – 2018. – № 2. – С. 52–55.
- Валигура Н.С. Способы бурения неглубоких скважин // *Разведка и охрана недр*. – 2014. – № 2. – С. 27–30.
- Тимофеев Н.Г., Скрыбин Р.М., Яковлев Б.В. Повышение эффективности работы породоразрушающего инструмента при бурении скважин в многолетнемерзлых породах // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 6. – С. 105–113.
- Скрыбин Р.М., Леонтьев С.Н., Тимофеев Н.Г. Бурение скважин большого диаметра пневмоударным кластером в породах высокой категории буримости // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, по-*

- священной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. – С. 570–574.
18. Линьков С.А. Разработка конструкции и обоснование параметров рабочего органа для бурения скважин в мерзлых грунтах: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2007. – 185 с.
 19. Li H., Liu S., Chang H. Experimental research on the influence of working parameters on the drilling efficiency // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2020. – V. 95. – P. 103–174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103174> (дата обращения 15.01.2023).
 20. Widening drilling operation: performance analysis on the application of fixed cutter drill bits in hard rock formation / J. De Moura, Y. Xiao, D. Ahmed, J. Yang, S.D. Butt // *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. – American Society of Mechanical Engineers. – 2020. – V. 11. – С. 61–78. URL: <https://doi.org/10.1115/OMAЕ2020-18836> (дата обращения 15.01.2023).
 21. Бугаев В.Г., Ереско С.П., Бугаев И.В. Выбор рационального угла резания мерзлых грунтов при бурении строительных скважин // *Строительные и дорожные машины*. – 2018. – № 2. – С. 30–36.
 22. Бурение дополнительных боковых стволов долотами PDC / Р.М. Богомолов, Д.Ю. Сериков, А.М. Гринев, Н.И. Дедов // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2018. – № 2. – С. 17–20.
 23. Панин Н.М., Богомолов Р.М. Совершенствование промывки шарошечных буровых долот // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2020. – № 9. – С. 11–14.
 24. Сериков Д.Ю. Анализ конструкций и технологий изготовления твердосплавного вооружения шарошечных буровых долот // *Сфера. Нефть и Газ*. – 2017. – № 1. – С. 30–35.
 25. Darwesh A.K., Rasmussen T.M., Al-Ansari N. Controllable drilling parameter optimization for roller cone and polycrystalline diamond bits // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – V. 10. – № 4. – P. 1657–1674. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00823-1> (дата обращения 15.01.2023).
 26. The characterization of wear in roller cone drill bit by rock material – sandstone / Yu. Sporin, P. Mrvar, M. Petric, G. Vizintin, Z. Vukelić // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 173. – P. 1355–1367. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.090> (дата обращения 15.01.2023).
 27. Zhang Jie, Yang Hu. Mechanical behavior and sealing performance of metal sealing system in roller cone bits // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – V. 33. – № 6. – P. 2855–2862. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0533-5> (дата обращения 15.01.2023).
 28. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Взаимодействие винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым грунтом // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. – 2020. – Т. 17. – № 2 (72). – С. 162–171. URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171> (дата обращения 15.01.2023).
 29. Drilling tool for frozen ground / I. Martuychenko, M. Zenin, A. Kolesnikov, S. Ivanov // *Gornyi Zhurnal*. – 2022. – V. 3. – P. 49–53. URL: <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.03.07> (дата обращения 15.01.2023).
 30. Drilling tools on frozen soils / I. Martuychenko, M. Zenin, S. Ivanov, A. Kolesnikov // *Mining Informational and Analytical Bulletin*. – 2022. – V. 10–16. – P. 59–65. URL: https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_59 (дата обращения 15.01.2023).

Поступила: 10.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 10.03.2023 г.

Информация об авторах

Мартюченко И.Г., доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геометрии и основ САПР Саратовского технического университета имени Гагарина Ю.А.

Зенин М.И., кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геометрии и основ САПР Саратовского технического университета имени Гагарина Ю.А.

Колесников А.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геометрии и основ САПР Саратовского технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бойков Е.В., старший преподаватель кафедры инженерной геометрии и основ САПР Саратовского технического университета имени Гагарина Ю.А.

UDC 622.23.05

THEORETICAL STUDIES OF DRILLING FROZEN SOILS WITH A SCREW DRILL

Igor G. Martyuchenko¹,
rosdortex_sstu@rambler.ru

Maxim I. Zenin¹,
zenin-1995@mail.ru

Alexey Yu. Kolesnikov¹,
kolesnikovaleksei@yandex.ru

Evgeny V. Boikov¹,
boikov_e@mail.ru

¹ Saratov Gagarin Technical University,
77, Politechnicheskaya street, 410054, Saratov, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to create a new drilling tool to drill frozen soil in difficult conditions. This line of research is important and relevant for ensuring the formation of wells on frozen sands, since the screw drilling tool performs the deformation of frozen soil separation, which makes it possible to drill hard-to-drill soils, namely frozen sands.

The main aim: to study the interaction of the destructive part of the helical drill with frozen soil and determine the rational values of the geometric parameters of the helical blade when achieving the lowest value of the force of soil separation and the highest value of the productivity of drilling.

Objects: interaction of the destructive part of the helical blade of a helical drill with frozen soil.

Methods: plotting dependencies of factors showing the energy intensity of drilling, on the angle of rotation of the radius of the helical blade, at which it increments, and on the pitch of the helical blade in the second section of the destructive part of the helical drill; analysis of the obtained results of theoretical studies of the force of soil separation and the efficiency of drilling from the geometric parameters of the helical blade of a drilling tool on frozen soils.

Results. The authors have studied the influence of the geometrical parameters of the helical drill on well formation, obtained the dependences of the efforts and constructed the graphs for soil separation, as well as the dependence of the productivity of drilling on the angle of rotation of the radius of the helical blade, at which it increments, and on the pitch of the helical blade in the second section of the destructive part of the helical drill. Based on the results of theoretical studies, an analysis of the obtained dependencies was carried out and the area of rational values of the geometric parameters of the helical blade of a helical drill on frozen soils was found.

Key words:

Well drilling, frozen soils, screw drill, soil destruction, well formation, drilling tools.

REFERENCES

- Lev V.E., Lev V.E., Izzy M.K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*, 2019, vol. 38, pp. 128–135.
- Shan W., Hu Z., Guo Y., Zhang C., Liu Y. Resistivity model of frozen soil and high-density resistivity method for exploration discontinuous permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*, 2017, vol. 23, pp. 23–52.
- Cao P., Yang C., Chen Y., Chen B., Talalay P. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, vol. 120, pp. 138–144.
- Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*, 2012, vol. 81, pp. 151–153.
- Arenson L.U., Springman S.M. Mathematical descriptions for the behavior of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 C. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, vol. 42, pp. 431–442.
- Gerasimov D.S., Andreeva N.Yu., Polukov S.A., Ovchinnikov V.P., Ovchinnikov P.V. O vliyaniy rezhima nagruzheniya na mekhanicheskie svoystva merzlykh gruntov [On the influence of the loading regime on the mechanical properties of frozen soils]. *Nazemnye transportno-tehnologicheskie komplekisy i sredstva. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2016. pp. 73–77. In Rus.
- Yang Z.J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold regions science and technology*, 2015, vol. 113, pp. 12–19.
- Aksenov V.I., Kalbergenov R.G., Leonov A.R. Strength characteristics of frozen saline soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2003, vol. 40, pp. 55–59.
- Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil. *Cold regions science and technology*, 2010, vol. 64, pp. 39–45.
- Zhou G., Hu K., Zhao X., Wang J., Liang H., Lu G. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, vol. 113, pp. 81–90.
- Timofeev N.G., Zhirkov A.N. The concept of developing an innovative rock cutting tool for drilling wells in permafrost. *Evraziyskiy soyuz uchenykh*, 2015, vol. 4, pp. 151–154. In Rus.
- Talalay P.G. Introduction to ice drilling technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*, 2016, vol. 42, pp. 1–8.
- Ivkin V.S., Alashev M.O. Influence of physical and mechanical properties of soils on the operation of machines for earthworks. *Vestnik UIGTU*, 2015, vol. 3, pp. 62–67. In Rus.
- Ivkin V.S., Vunberova N.P. Small-volume, dispersed winter earthworks in cramped conditions of construction. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 2, pp. 52–55. In Rus.
- Valigura N.S. Methods for drilling shallow wells. *Razvedka i okhrana nedr*, 2014, vol. 2, pp. 27–30. In Rus.
- Timofeev N.G., Skryabin R.M., Yakovlev B.V. Improving the efficiency of the rock cutting tool when drilling wells in permafrost. *Fiziko-tehnicheskije problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*, 2017, vol. 6, pp. 105–113. In Rus.
- Skryabin R.M., Leontiev S.N., Timofeev N.G. Burenie skvazhin bolshogo diametra pnevmoudarnym klasterom v porodakh vysokoy kategorii burimosti [Drilling large-diameter wells with a pneumatic percussion cluster in rocks of a high drillability category]. *Geologiya i mineralno-syrevnye resursy Severo-vostoka Rossii. Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*,

- posvyashchennoy 60-letiyu Instituta geologii almaza i blagorodnykh metallov Sibirskogo otdeleniya RAN* [Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia. Proc. of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]. Yakutsk, NEFU Publ. House, 2017. pp. 570–574.
18. Linkov S.A. *Razrabotka konstruktivnykh i obosnovanie parametrov rabochego organa dlya bureniya skvazhin v merzlykh gruntakh*. Dis. Kand. nauk [Development of the design and justification of the parameters of the working body for drilling wells in frozen soils. Cand. Diss.]. Omsk, 2007. 185 p. In Rus.
 19. Li H., Liu S., Chang H. Experimental research on the influence of working parameters on the drilling efficiency. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 95, pp. 103–174. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103174> (accessed 15 January 2023).
 20. De Moura J., Xiao Y., Ahmed D., Yang J., Butt S. D. Widening drilling operation: performance analysis on the application of fixed cutter drill bits in hard rock formation. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2020, vol. 11, pp. 61–78. Available at: <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18836> (accessed 15 January 2023).
 21. Bugaev V.G., Eresko S.P., Bugaev I.V. The choice of a rational cutting angle for frozen soils when drilling construction wells. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2018, vol. 2, pp. 30–36. In Rus.
 22. Bogomolov R.M., Serikov D.Yu., Grinev A.M., Dedov N.I. Drilling additional sidetracks with PDC bits. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2018, vol. 2, pp. 17–20. In Rus.
 23. Panin N.M., Bogomolov R.M. Improving flushing of cone drill bits. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2020, vol. 9, pp. 11–14. In Rus.
 24. Serikov D.Yu. Analysis of designs and manufacturing technologies for hard-alloy cutting tools of roller-cone drilling bits. *Sfera. Neft i Gaz*, 2017, vol. 1, pp. 30–35. In Rus.
 25. Darwesh A.K., Rasmussen T.M., Al-Ansari N. Controllable drilling parameter optimization for roller cone and polycrystalline diamond bits. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, vol. 10, pp. 1657–1674. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00823-1> (accessed 15 January 2023).
 26. Sporin Yu., Mrvar P., Petric M., Vizintin G., Vukelić Z. The characterization of wear in roller cone drill bit by rock material – sandstone. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 173, pp. 1355–1367. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.090> (accessed 15 January 2023).
 27. Zhang Jie, Yang Hu. Mechanical behavior and sealing performance of metal sealing system in roller cone bits. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, no. 6, pp. 2855–2862. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0533-5> (accessed 15 January 2023).
 28. Martyuchenko I.G., Zenin M.I. Interaction of a helical blade of a drilling tool with frozen soil. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobilno-dorozhnoy akademii*, 2020, vol. 17, no. 2 (72), pp. 162–171. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171> (accessed 15 January 2023).
 29. Martyuchenko I., Zenin M., Kolesnikov A., Ivanov S. Drilling tool for frozen ground. *Gornyi Zhurnal*, 2022, vol. 3, pp. 49–53. Available at: <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.03.07> (accessed 15 January 2023).
 30. Martyuchenko I., Zenin M., Ivanov S., Kolesnikov A. Drilling tools on frozen soils. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2022, vol. 10-1, pp. 59–65. Available at: https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_59 (accessed 15 January 2023).

Received: 10 February 2023.

Reviewed: 10 March 2023.

Information about the authors

Igor G. Martyuchenko, Dr. Sc., professor, Saratov Gagarin Technical University.

Maxim I. Zenin, Cand. Sc., associate professor, Saratov Gagarin Technical University.

Alexey Yu. Kolesnikov, Cand. Sc., associate professor, Saratov Gagarin Technical University.

Evgeny V. Boikov, senior lecturer, Saratov Gagarin Technical University.