

Научная статья

УДК 624.139

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>

EDN: CQICCH



Check for updates

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИНТОВОГО БУРА МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

М.И. Зенин*, С.В. Иванов

ФГБОУ ВО «СГТУ имени Ю.А. Гагарина»,

г. Саратов, Россия

zenin-1995@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5296-6841>serezha_ivanov_vik@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0007-5110-6349>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс образования скважин в мерзлых грунтах является одним из сложных процессов производства земляных работ. Буровой инструмент новой геометрической формы образует скважину хрупким разрушением породы. Целью проведенных экспериментальных исследований являлось определить влияние на энергоемкость процесса бурения и на коэффициент диаметра скважины угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения.

Материалы и методы. В статье описана методика проведения лабораторных экспериментов изучения процесса взаимодействия бурового инструмента новой геометрической формы с мерзлыми грунтами. Определены диапазоны значений исследуемых факторов. Построена матрица полного факторного эксперимента.

Результаты. В результате лабораторных экспериментов было определено влияние геометрических параметров бурового инструмента на энергоемкость процесса бурения и на коэффициент диаметра скважины. Установлены зависимости крутящего момента и коэффициент диаметра скважины от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения и угла подъема средней винтовой линии винтовой лопасти.

Заключение. Установлено, что буровой инструмент осуществляет образование скважины за счет ее хрупкого разрушения, что позволяет достигать более эффективного бурения. А также определены зависимости рациональных значений исследуемых геометрических параметров бурового инструмента новой геометрической формы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: винтовой рабочий орган, мерзлый грунт, бурение мерзлого грунта, винтовая лопасть, откол грунта, внедрение лопасти, разрушающая часть, буровой инструмент

Статья поступила в редакцию 13.10.2023; одобрена после рецензирования 16.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Зенин М.И., Иванов С.В. Экспериментальные исследования взаимодействия винтового бура с мерзлым грунтом // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 696-705. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>

© Зенин М.И., Иванов С.В., 2023

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>

EDN: CQICCH

EXPERIMENTAL STUDIES OF SCREW DRILL WITH FROZEN SOIL INTERACTION

Maksim I. Zenin*, Sergei V. Ivanov

Yu. A. Gagarin Saratov State Technical University,

Saratov, Russia

zenin-1995@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5296-6841>

serezha_ivanov_vik@mail.ru, <http://orcid.org/>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. The process of formation of wells in frozen soils is one of the complex processes of excavation. A drilling tool of a new geometric shape forms a well by brittle destruction of the rock. The purpose of the conducted experimental studies was to determine the effect on the energy intensity of the drilling process and on the well diameter coefficient of the angle of rotation of the radius of the screw blade, at which its increment occurs on the destructive part and the angle of inclination of the forming upper surface of the screw blade to the axis of rotation.

Materials and methods. The article describes a methodology for conducting laboratory experiments to study the interaction of a drilling tool of a new geometric shape with frozen soils. The ranges of values of the studied factors are determined. The matrix of the complete factorial experiment is constructed.

Results. As a result of laboratory experiments, the influence of the geometric parameters of the drilling tool on the energy intensity of the drilling process and on the well diameter coefficient was determined. The dependencies of the torque and the well diameter coefficient on the angle of rotation of the radius of the helical blade, at which its increment occurs on the destructive part, the angle of inclination of the forming upper surface of the helical blade to the axis of rotation and the angle of elevation of the middle helical line of the helical blade are established.

Discussions and conclusion. It is established that the drilling tool carries out the formation of a well due to the brittle destruction of the well, which makes it possible to achieve more efficient drilling. And also the dependences of the rational values of the investigated geometric parameters of the drilling tool of a new geometric shape are determined.

KEYWORDS: screw working body, frozen ground, frozen ground drilling, screw blade, ground break, blade insertion, breaking part, drilling tool

The article was submitted 13.10.2023; approved after reviewing 16.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Zenin M.I., Ivanov S.V. Experimental studies of screw drill with frozen soil interaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 696-705. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>

© Zenin M. I., Ivanov S. V., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

На большей части территории России распространено сезонное промерзание грунтов, а более 60% занимают многолетнемерзлые породы. В связи с активным освоением этих территорий возникают трудности при бурении грунтов. Причиной этого является достаточно сложная структура мерзлых грунтов, которые характеризуются особенностью физико-механических свойств, высокой прочностью и абразивностью. В большинстве случаев при механическом вращательном бурении применяются два способа разрушения: резание и дробящее действие. Такие характеры деформации являются энергоемкими [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Производство таких работ требует, как правило, применения машин повышенной мощности и, соответственно, повышенных энергетических затрат. Несмотря на имеющееся огромное разнообразие средств механизации, методов и совершенствования технологий, вопрос механизации зимних земляных работ остается до конца не решенным [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Бурение мерзлого грунта предлагаемым буровым инструментом новой геометрической формы осуществляется деформацией отрыва грунта. Такой процесс обеспечивает образование скважины при меньших энергозатратах по сравнению с другими буровыми инструментами. Предлагаемый буровой инструмент условно состоит из заходной и разрушающей частей. Заходная часть обеспечивает тяговое усилие, необходимое для его работы. Разрушающая часть содержит винтовую лопасть с переменными геометрическими параметрами. На разрушающей части лопасть имеет постоянный шаг и переменный радиус, изменяющийся при повороте радиуса на определенный угол (ψ), при этом изменяется наклон верхней образующей поверхности винтовой лопасти к оси вращения – от острого до прямого угла [27, 28].

На данный момент процесс взаимодействия бурового инструмента новой геометрической формы с мерзлым грунтом для образования скважины не изучен и требует должных исследований.

При изучении процесса разрушения мерзлого грунта винтовым буром основными задачами экспериментальных исследований являлось:

– определить влияние на крутящий момент бурового инструмента и на коэффициент диаметра скважины угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части ψ и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения α ;

– определение рациональных значений угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части ψ и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения α .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде (рисунок 1), который был оснащен оборудованием и приспособлениями, позволяющими производить и изучать процесс бурения моделями винтовых буров в форме с мерзлым грунтом.

Лабораторный стенд был оснащен комплексом контрольно-измерительной аппаратуры: тензометрический прибор с цифровым дисплеем для регистрации сигнала от датчика усилия сжатия, цифровой лазерный счетчик оборотов вращения модели винтового бура. Перед началом опыта и после его окончания производилась тарировка датчиков.

Экспериментальные исследования осуществлялись на искусственно приготовленных образцах мерзлого грунта. В качестве мерзлых грунтов в экспериментах использовались мерзлый песок, мерзлый суглинок и мерзлая супесь. Наибольший интерес представлял мерзлый песок. Выбор этого грунта для изучения физического процесса взаимодействия бурового инструмента определялся тем, что мерзлый песок представляет собой материал с хрупкими свойствами. Для достижения массивной криогенной текстуры грунт в форме замораживался в холодильной камере при температуре и выдерживался не менее 48 ч при заданной температуре. Температура грунта в большинстве опытов была от -10°C до -20°C . Влажность при этом составляла в среднем: для песка – 15%, для супеси – 18%, для суглинка – 20%. Показатель прочности подготовленных образцов грунта по числу ударов плотномера ДорНИИ составлял от 420 до 550 ударов.

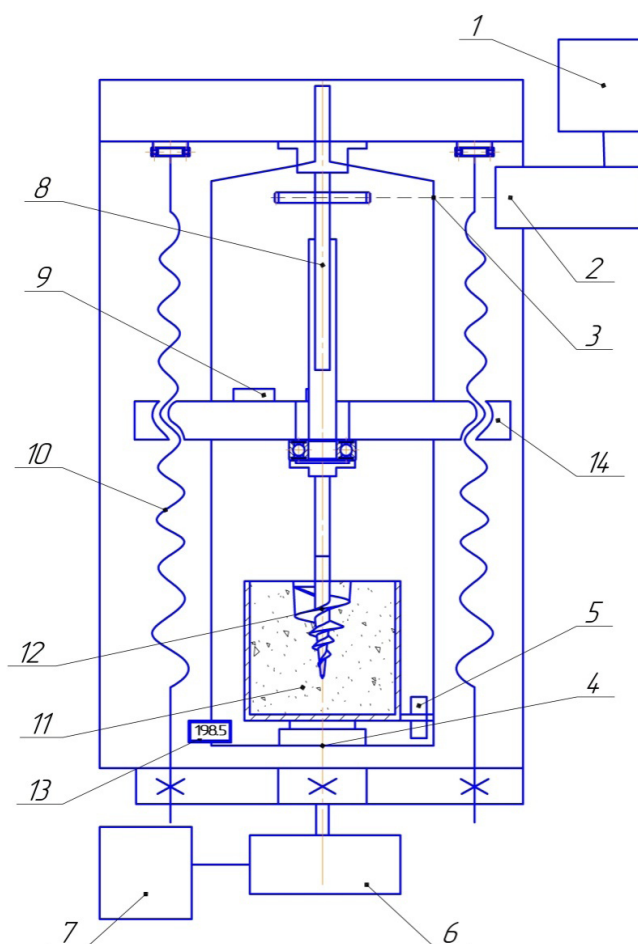


Рисунок 1 – Лабораторный стенд для экспериментальных исследований процесса бурения:
 1 – двигатель вращения бура; 2 – редуктор конический; 3 – цепная передача;
 4 – поворотная площадка; 5 – датчик крутящего момент; 6 – редуктор;
 7 – двигатель для вращения винтов; 8 – телескопическая штанга;
 9 – лазерный датчик оборотов; 10 – ходовые винты;
 11 – форма с подготовленным грунтом; 12 – буровой инструмент; 13 – динамометр;
 14 – подвижная траверса
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Laboratory stand for experimental studies of the drilling process:
 1 – drill rotation motor; 2 – bevel gear; 3 – chain transmission; 4 – turntable;
 5 – torque sensor; 6 – gearbox; 7 – motor for rotating screws; 8 – telescopic rod;
 9 – laser speed sensor; 10 – way screws; 11 – mold with prepared soil; 12 – drilling tool;
 13 – dynamometer; 14 – movable traverse
 Source: compiled by the authors.

Лабораторные экспериментальные исследования проводились следующим образом. На лабораторный стенд устанавливалась форма с подготовленным мерзлым грунтом, буровому инструменту придавалось вращательное движение и начальное задавливающее осевое усилие.

Экспериментальные исследования осуществлялись на масштабных моделях бурово-

го инструмента [29]. Варьирование изучаемых параметров моделей бурового инструмента осуществлялось по таблице.

Варианты исследуемых моделей винтовых буров представлены на рисунке 2. В качестве переменных факторов были выбраны следующие геометрические параметры бурового инструмента:



Рисунок 2 – Исследуемые модели буровых инструментов:
1 – $\psi=270^\circ, \alpha=70^\circ$; 2 – $\psi=90^\circ, \alpha=70^\circ$; 3 – $\psi=270^\circ, \alpha=70^\circ$; 4 – $\psi=90^\circ, \alpha=70^\circ$;
5 – $\psi=270^\circ, \alpha=60^\circ$; 6 – $\psi=90^\circ, \alpha=60^\circ$; 7 – $\psi=90^\circ, \alpha=60^\circ$; 8 – $\psi=270^\circ, \alpha=60^\circ$;
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Investigated models of screw drills:
1 – $\psi=270^\circ, \alpha=70^\circ$; 2 – $\psi=90^\circ, \alpha=70^\circ$; 3 – $\psi=270^\circ, \alpha=70^\circ$; 4 – $\psi=90^\circ, \alpha=70^\circ$;
5 – $\psi=270^\circ, \alpha=60^\circ$; 6 – $\psi=90^\circ, \alpha=60^\circ$; 7 – $\psi=90^\circ, \alpha=60^\circ$; 8 – $\psi=270^\circ, \alpha=60^\circ$;
Source: compiled by the authors.

– ψ – угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части, град;

– α – угол наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения, град;

В теоретических исследованиях [28] были определены диапазоны значений следующих факторов: угол наклона α находится в диапазоне от 60 до 70. Диапазон значения угла поворота ψ находится в диапазоне значений от 90 до 270. Уровни варьирования геометрических параметров исследуемых моделей винтовых буров представлены в таблице.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась матрица полного факторного эксперимента для числа незави-

симых переменных $m = 2$, предусматривающих проведение 24 опытов.

В ходе лабораторных экспериментов осуществлялась фиксация крутящего момента процесса бурения мерзлого грунта по средствам тензометрического прибора с цифровым дисплеем для регистрации сигнала от датчика усилия сжатия. Диаметр скважины замерялся при помощи штангельциркуля. Погрешность измеряемых значений составляла 5%.

На рисунке 3 представлена картина процесса разрушения мерзлого песка деформацией отрыва на поверхности грунта.

После проведения опытов происходила обработка полученных результатов. Производилось отсеивание ошибочных результатов по среднему квадратическому отклонению.

Таблица
Параметры исследуемых моделей буровых инструментов
Источник: составлено авторами.

Table
Parameters of the investigated models of drilling tools
Source: compiled by the authors.

	Факторы	
	ψ	α
Верхний уровень	270°	70°
Нижний уровень	90°	60°
Основной уровень	180°	65°
Интервал варьирования	90°	5°

Далее производилась проверка однородности дисперсии с помощью критерия Кохрена, при проверке адекватности вычисления использовался F-критерий Фишера и проверку значимости коэффициентов определяли с помощью критерия Стьюдента.

В результате реализации многофакторного плана лабораторных экспериментов были получены функциональные зависимости критериев работоспособности от геометрических параметров бурового инструмента новой геометрической формы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

График зависимостей исследуемых геометрических параметров на крутящий момент M буровым инструментом новой геометрической формы представлен на рисунке 4.



Рисунок 3 – Процесс разрушения грунта буровым инструментом
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The process of soil destruction by drilling tools
Source: compiled by the authors.

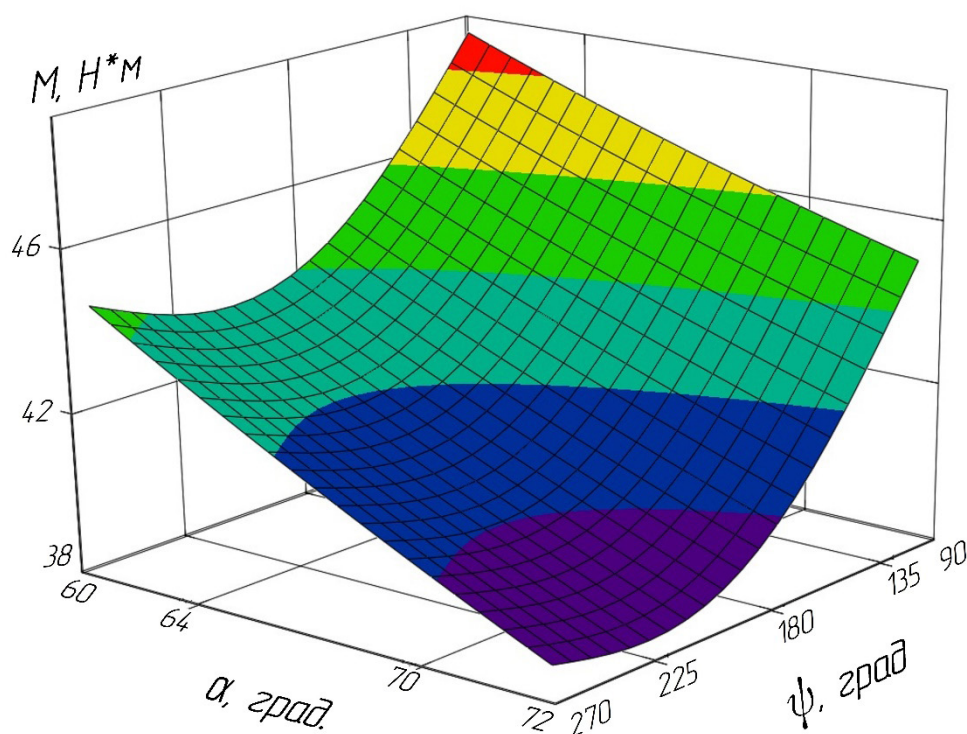


Рисунок 4 – График зависимости крутящего момента M от угла поворота радиуса ψ и угла наклона α
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graph of the dependence of the torque M on the angle of ψ rotation and α angle of inclination
Source: compiled by the authors.

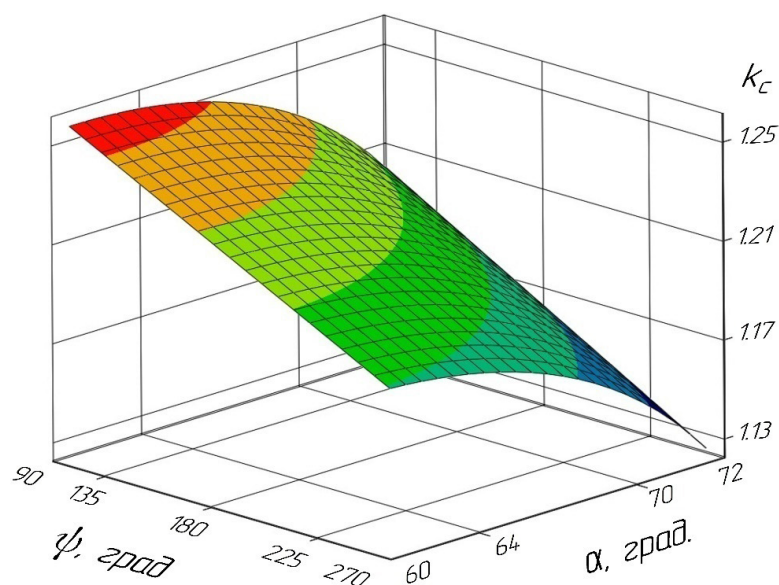


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента диаметра скважины от угла поворота и угла наклона
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graph of the dependence of the well diameter coefficient on ψ angle of rotation and α angle of inclination:
Source: compiled by the authors.

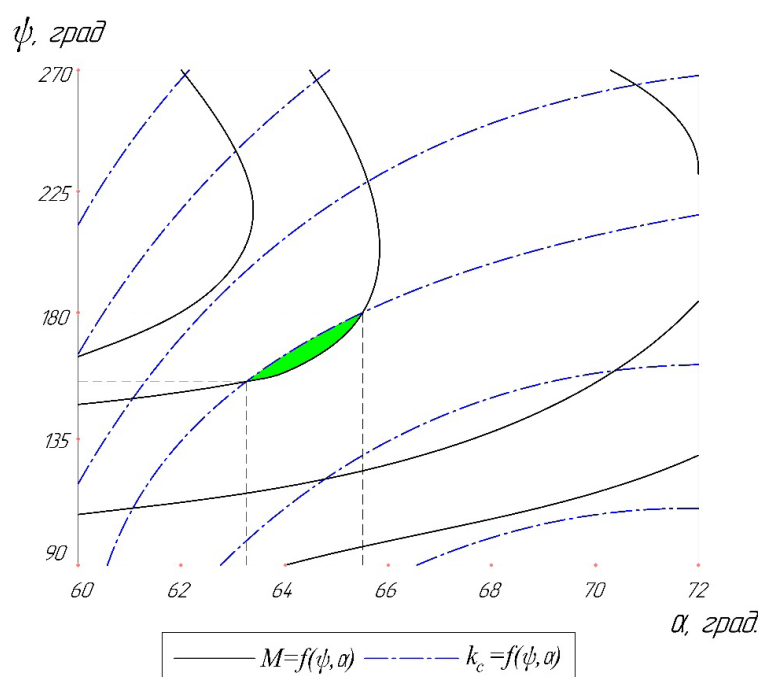


Рисунок 6 – График зависимости крутящего момента M и коэффициента от угла поворота и от угла наклона
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Graph of the dependence of M torque and coefficient on ψ angle of rotation and on α angle of inclination
Source: compiled by the authors.

Изменение значения угла наклона винтовой лопасти α находящийся в диапазоне от 60° до 70° , приводит к уменьшению значения величины крутящего момента сначала на 5%. Увеличение угла поворота радиуса винтовой лопасти бурового инструмента в диапазоне от 90° до 270° приводит к уменьшению значения величины крутящего момента на 19%.

График зависимости коэффициента диаметра скважины от исследуемых геометрических параметров представлен на рисунке 5.

На рисунке 5 видно, что большее влияние на коэффициент диаметра скважины оказывает угол наклона α . С увеличением угла наклона α происходит увеличение коэффициента диаметра скважины на 8%. Меньшее влияние оказывает угол поворота ψ , увеличение коэффициента диаметра скважины происходит на 6%.

График зависимостей крутящего момента M и коэффициента k_c от угла поворота ψ и от угла наклона α представлен на рисунке 6.

Оценка полученных результатов исследований, в том числе визуальных наблюдений в ходе опытов с испытуемыми моделями винтовых буров, подтвердила ранее полученные выводы о том, что на эффективность процесса разрушения грунта деформацией отрыва основное влияние оказывает угол поворота ψ . При рациональном значении данного угла снижаются значения величины крутящего момента на 15–25% и увеличивается значение коэффициента скважины на 6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа следует, что для обеспечения минимального значения крутящего момента бурового инструмента и максимального значения коэффициента увеличения диаметра ствола скважины k_c необходимо использование бурового инструмента со следующими значениями геометрических параметров: угол поворота $\psi=170-180^\circ$ и угол наклона $\alpha=63-65^\circ$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lev V. E., Lev V. E., Izzy M. K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019. vol. 38.
2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and High-Density Resistivity Method for Exploration Discontinuous Permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017. pp. 23-52.
3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. vol. 120. pp. 138-144.
4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012, vol. 81, no. 2, pp. 151-153.
5. 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. T. 42. №. 2. С. 431-442.
6. Герасимов Д. С. [и др.] О влиянии режима нагружения на механические свойства мерзлых грунтов // *Наземные транспортно-технологические комплексы и средства*. 2016. С. 73–77.
7. 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.
8. Aksenov, V.I., Kal'bergenov, R.G. & Leonov, A.R. Strength Characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003, vol. 40, pp. 55–59.
9. 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. T. 64. №. 1. P. 39-45.
10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. T. 113. P. 81-90.
11. 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.
12. Talalay P. G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore, 2016. pp. 1-8.
13. Ивкин В.С., Алашеев М. О. Влияние физико-механических свойств грунтов на работу машин для земляных работ // *Вестник УлГТУ*. 2015. № 3. С. 62–67.
14. 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.
15. Валигура Н. С. Способы бурения неглубоких скважин // *Разведка и охрана недр*. 2014. №. 2. С. 27–30.
16. Тимофеев Н.Г., Скрябин 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.
17. Du H. Strength properties of icy frozen silt sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture content. *Science and technology of coldregions*. 2016, no. 123, pp. 107-113.
18. Черкасов В. И. Области применения и проблемы бурения неглубоких скважин // *Разведка и охрана недр*. 2014. №. 2. С. 24–27.
19. Валигура Н. С. Породоразрушающие инструменты для вращательного бурения неглубоких скважин и их основные конструктивные особенности // *Разведка и охрана недр*. 2014. №. 2. С. 30–33.

20. Богомолов Р. М. [и др.] Бурение дополнительных боковых стволов долота PDC // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 2. С. 17–20.

21. 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.

22. Сериков Д. Ю. Анализ конструкций и технологий изготовления твердосплавного вооружения шарошечных буровых долот // Сфера. Нефть и Газ. 2017. № 1. С. 30–35.

23. Саленко А. Ф., Федотьев А. Н., Федотьев Н. А. Перспективы использования регенерированного твердого сплава для производства буровых долот // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. 2014. № 150. С. 139–145.

24. Анализ проходки шарошечных долот в условиях Олимпиадинского ГОКа ЗАО «ПОЛЮС» / А.В. Гилев, К.А. Бовик, А.О. Шигин, И.Р. Белозеров // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 153–153.

25. Zhiqiang H., Qin L., Yi Z., Shuang J., Yachao M., Wengang H., Yongtao F. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2013, no.12, pp. 12–26.

26. Бугаев В.Г., Ереско С. П., Бугаев И.В. Выбор и обоснование конструктивных параметров бурового режущего инструмента для проходки скважин в мерзлых грунтах // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 6–13.

27. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Перспективы развития бурового инструмента для вечномёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. № 9. С. 47–48.

28. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Взаимодействие винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым грунтом // Вестник СибАДИ. 2020; 17(2): 162–171. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>

29. Баловнев В. И. [и др.] Определение оптимальных параметров транспортно-технологических машин методами теории подобных преобразований // Строительные и дорожные машины. 2019. № 12. С. 3–11.

REFERENCES

1. Lev V. E., Lev V. E., Izzy M. K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019; vol. 38: 1–9.

2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and High-Density Resistivity Method for Exploration Discontinuous Permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017: 23–52.

3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015; vol. 120: 138–144.

4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012; vol. 81, no. 2: 151–153.

5. 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; vol. 42, no. 2: 431–442.

6. Gerasimov D. S. i dr. O vlijanii rezhima nagruzheniya na mehanicheskie svojstva merzlyh gruntov [On the influence of the loading regime on the mechanical properties of frozen soils.]. *Nazemnye transportno-tehnologicheskie komplekсы i sredstva*. 2016; 73–77. (in Russ.)

7. 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.

8. Aksenov, V.I., Kal'bergenov, R.G. & Leonov, A.R. Strength Characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; vol. 40: 55–59

9. 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, no. 1: 39–45.

10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils. *Cold regions science and technology*. 2015; vol. 113: 81–90.

11. Timofeev N.G., Zhirkov A.N. Konceptiya razrabotki innovacionnogo porodorazrushajushhego instrumenta dlja burenija skvazhin v uslovijah kriolitozony [The concept of developing an innovative rock cutting tool for drilling in cryolithozone conditions]. *Evrasijskij sojuz uchenyh*. 2015; 4: 151 – 154. (in Russ.)

12. Talalay P. G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore. 2016: 1–8.

13. Ivkin V.S., Alasheev M.O. Vlijanie fiziko-mehaničeskix svojstv gruntov na rabotu mashin dlja zemljanyh rabot [The influence of physical and mechanical properties of soils on the work of machines for earthworks]. *Vestnik UIGTU*. 2015; 3: 62 – 67. (in Russ.)

14. Ivkin V. S., Vunberova N. P. Maloob'jomnye, rassredotočennye zimnie zemljanye raboty v stesnonnyh uslovijah stroitel'stva [Small, dispersed winter earthworks in cramped construction conditions]. *Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2018; 2: 52–55. (in Russ.)

15. Valigura N. S. Sposoby burenija neglubokih skvazhin [Methods of drilling shallow wells]. *Razvedka i ohrana nedr*. 2014; 2: 27–30. (in Russ.)

16. Timofeev N. G., Skrijabin R.M., Jakovlev B.V. Povysenie jeffektivnosti raboty porodorazrushajushhego instrumenta pri burenii skvazhin v mnogoletnemerzlyh porodah [Improving the efficiency of a rock-breaking tool when drilling wells in permafrost rocks. Physico-technical problems of mineral development]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2017; 6:105–113. (in Russ.)

17. Du H. Strength properties of icy frozen silt sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture content. *Science and technology of cold regions*. 2016; no. 123:107–113.

18. Cherkasov V. I. Oblasti primeneniya i problemy burenija neglubokih skvazhin [Fields of application and problems of drilling shallow wells]. *Razvedka i ohrana nedr*. 2014; 2: 24–27. (in Russ.)

19. Valigura N. S. Porodorazrushajushhie instrumenty dlja vrashhatel'nogo burenija neglubokih skvazhin i ih osnovnye konstruktivnye osobennosti [Rock-Breaking tools for rotational drilling of shallow wells and their main design features]. *Razvedka i ohrana nedr.* 2014; 2: 30-33. (in Russ.)

20. Bogomolov R. M. [i dr.] Burenie dopolnitel'nyh bokovyh stvolov dolota PDC [Drilling of additional side shafts of the PDC bit]. *Oborudovanie i tehnologii dlja neftegazovogo kompleksa.* 2018; 2: 17-20. (in Russ.)

21. Panin N. M., Bogomolov R.M. Bogomolov R. M. Sovershenstvovanie promytki sharoshechnykh burovyyh dolot [Improvement of washing of spherical drill bits]. *Stroitel'stvo nefjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more.* 2020; 9: 11-14. (in Russ.)

22. Serikov D. Ju. Analiz konstrukcij i tehnologij izgotovlenija tverdosplavnogo vooruzhenija sharoshechnykh burovyyh dolot [Analysis of designs and manufacturing technologies of carbide weapons of spherical drill bits]. *Sfera. Neft' i Gaz.* 2017;1: 30-35. (in Russ.)

23. Salenko A. F., Fedot'ev A. N., Fedot'ev N. A. Perspektivy ispol'zovanie regenerirovannogo tverdogo splava dlja proizvodstva burovyyh dolot [Prospects for the use of regenerated hard alloy for the production of drill bits]. *Visnik SevNTU. Serija: Mashinopriladobudovannja ta transport.* 2014; 150: 139-145. (in Russ.)

24. Gilev A. V., Bovik K.A., Shigin A.O., Belozerov I.R. Analiz prohodki sharoshechnykh dolot v usloviyah Olimpiadinskogo GOKa ZAO «POLJuS» [Analysis of rolling cone chisels in the conditions of the Olympiadinsky GOK CJSC POLYUS]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija.* 2015; 2: 153-153. (in Russ.)

25. Zhiqiang H., Qin L., Yi Z., Shuang J., Yachao M., Wengang H., Yongtao F. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering Failure Analysis.* 2013; no.12: 12-26.

26. Bugaev V.G., Eresko S.P., Bugaev I.V. Vybory i obosnovanie konstruktivnykh parametrov burovogo rezushhego instrumenta dlja prohodki skvazhin v merylyh gruntah [Selection and substantiation of design parameters of a drilling cutting tool for drilling holes in frozen soils]. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika.* 2013; 2: 6 – 13. (in Russ.)

27. Martiuchenko I.G., Zenin M.I. Perspektivy razvitiya burovogo instrumenta dlja vechnomerzlyh gruntov [Prospects for the development of drilling tools for permafrost soils]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny.* 2019; 9: 47-48. (in Russ.)

28. Martiuchenko I.G., Zenin M.I. interaction of a helical blade of a drilling tool with frozen ground. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2020; 17(2): 162-171. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>

29. Balovnev V. I. i dr. Opredelenie optimal'nykh parametrov transportno-tehnologicheskikh mashin metodami teorii podobnykh preobrazovanij [Determination of optimal parameters of transport and technological machines by methods of the theory of similar transformations]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny.* 2019; 12: 3-11. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Зенин М. И. Формулирование проблемы исследований, постановка задач исследования, обозначения алгоритма экспериментальных исследований, проведение экспериментальных исследований взаимодействия моделей винтового бура с мерзлым грунтом.

Иванов С. В. Анализ полученных результатов, выполнение обзора литературных источников.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Maksim I. Zenin – Statement of the research problem, statement of research tasks, designations of the experimental research algorithm, conducting experimental studies of the interaction of screw drill models with frozen soil.

Sergey V. Ivanov – analysis of the results obtained, review of information sources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зенин Максим Иванович – канд. техн. наук, проф., доц. кафедры «Транспортное строительство», SPIN-код: 1117-4492.

Иванов Сергей Викторович – канд. техн. наук, проф., доц. кафедры «Транспортное строительство», SPIN-код: 9003-0418.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maksim I. Zenin – Cand. Of Sci., Professor, Associate Professor of the Transport Construction Department, SPIN-код: 1117-4492.

Sergei V. Ivanov – Cand. Of Sci., Professor, Associate Professor of the Transport Construction Department, SPIN-код: 9003-0418.