УДК 621.23.05

Б.Б. Данилов, А.А. Речкин, Д.О. Чещин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ПОВОРОТА КОРПУСА УПРАВЛЯЕМОГО ПНЕВМОПРОБОЙНИКА

Аннотация. Рассмотрены особенности процесса сооружения протяженных скважин в приповерхностном грунтовом слое методом прокола. Показано, что наиболее эффективным техническим средством реализации этого метода являются пневмопробойники. Однако дальнейшее развитие технологии виброударного прокола пневмопробойниками, сдерживается таким фактором, как недостаточная точность выхода скважины в заданную точку подземного пространства. Устранить этот фактор предлагается посредством создания управляемых пневмопробойников, которые способны изменять траекторию движения по команде оператора. В контексте решения этой задачи сформулированы рекомендации по выбору метода корректировки траекторией движения пневмопробойника и основные требования к конструкции отклоняющего механизма. Предложена новая конструктивная схема механизма изменения траектории движения пневмопробойника и описан принцип его работы. Приведены результаты испытаний макета пневмопробойника с отклоненной хвостовой частью, а также результаты экспериментальных исследований процесса поворота корпуса пневмопробойника в грунте при воздействии на него отклоняющего усилия.

Ключевые слова: скважина, пневмопробойник, бестраншейные технологии, скважины криволинейной траекторией, корректировка траектории пневмопробойника.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-116-123

В настоящее время метод бурения является одним из основных методов образования вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин в грунте. Широкое применение получило так называемое направленное бурение, в процессе которого осуществляется корректировка направления скважин [1]. Этот метод применяется при бурении направленных скважин в угольных пластах (например, для отвода метана), при разработке нефтяных месторождений, при строительстве коммуникаций различного назначения. Применение направленного бурения в строительстве позволяет сохранить благоустройство территории, зеленые насаждения и, особенно важно, исключить остановку транспортных потоков на авто и железнодорожных магистралях [2—5].

В предшествующие десятилетия значительные объемы бестраншейных работ выполнялись методом прокола. Он выгодно отличается наибольшей простотой технологического процесса и компактностью применяемого оборудования. Этот метод позволяет проходить скважины небольшого диаметра (до 300 мм) в прочных грунтах, а также применяется для проходки пионерной скважины с последующим ее расширением в других бестраншейных технологиях. Ограничительным фактором при этом является то обстоятельство, что увеличение длины

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 7. С. 116–123.

скважин свыше 25—30 м неизбежно сопровождается уменьшением вероятности его выхода в проектную конечную точку вследствие действия случайных отклоняющих факторов [6]. Существенно расширить технологические возможности этого метода можно за счет оснащения пневмопробойников механизмом, позволяющим рабочему органу двигаться по заданной траектории, в том числе и криволинейной, и обеспечивающим тем самым выход скважины в заданную область подземного пространства.

В настоящее время в ИГД СО РАН разработана конструкция управляемого пневмопробойника [7, 8], способного изменять свою внешнюю формы за счет отклонения хвостовой части корпуса (рис. 1). Такое решение продиктовано несколькими обстоятельствами. Во-первых, заднее расположение отклоняющего элемента позволяет в полной мере использовать для ударного механизма отработанные и выверенные конструктивные решения, применяемые в серийных машинах. Во-вторых, диаметр корпуса в рассматриваемой конструктивной схеме равен диаметру образуемой скважины, что позволит сохранить величину удельной мощности машины. В-третьих, заднее расположение отклоняющего элемента позволяет упростить конструкцию механизма управления за счет использования воздухоподводящего рукава для передачи управляющих команд.

Механизм (рис. 1) представляет собой отклоняющую хвостовую часть *4*, которая шарнирно соединяется с задней гайкой *1* пневмопробойника *8* посредством гайки *2* и втулки *3*. Для создания отклоняющего усилия в устройство вмонтирована эластичная камера *7*, управляемая с помощью клапанного механизма *6*. Выбор направления, в котором необходимо отклонить пневмопробойник, осуществляется поворотом воздухоподводящего шланга (рукава) *5*. Для отклонения корпуса пневмопробойника в эластичную камеру через клапанный механизм подается давление. Камера создает усилие, которое поворачивает хвостовую часть относительно втулки *3* и корпуса пневмопробойника *8* на некоторый угол α.

Для проверки работоспособности и предварительной оценки эффективности выбранного способа управления траекторией пневмопробойника был создан макет пневмопробойника с отклоненной хвостовой частью (рис. 2). Габаритные размеры макета в масштабе 1:2 соответствуют размерам серийного пневмопробойника ИП4605.

При изготовлении модели была предусмотрена возможность углового отклонения оси задней части корпуса. В качестве ударника использовался металлический цилиндр диаметром 36 мм и длиной 146 мм, к которому в задней части был прикреплен стальной прут диаметром 10 мм и длиной 2500 мм. Масса ударника и длина его хода были

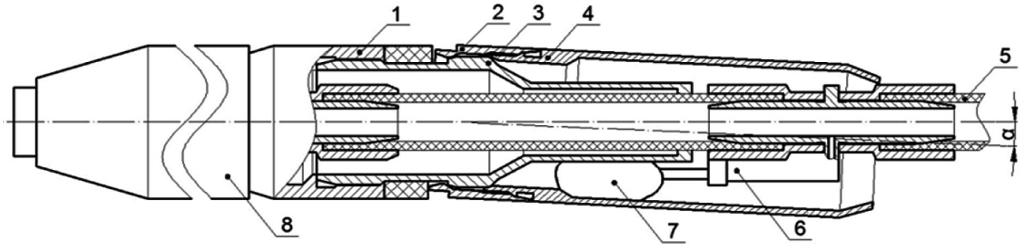

Рис. 1. Схема механизма управления траекторией пневмопробойника (при отклоненной хвостовой части)

Fig. 1. Layout of path control mechanism of pneumatic piercing machine (with deflected rear)

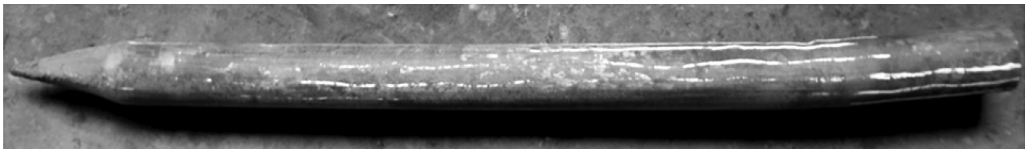

Рис. 2. Модель пневмопробойника с отклоненной хвостовой частью
Fig. 2. Model of pneumatic piercing tool with deflected rear

определены исходя из соответствия удельной энергии удара (на единицу площади сечения скважины) паспортным значениям пневмопробойников. Удары наносились вручную.

В экспериментальном грунтовом канале, находящимся на базе ИГД СО РАН Зеленая Горка, с этой моделью были проведены две серии экспериментов при двух значениях плотности грунта. Эксперименты позволили установить зависимость между углом отклонения хвостовой части и величиной отклонения оси корпуса пневмопробойника на 1 м длины скважины. Установленная зависимость представлена в графическом виде на рис. 3. Для оценки достаточности этой величины проведен анализ результатов ранее проводившихся в ИГД СО РАН исследований прямолинейности скважин, образованных пневмопробойником [10].

Анализ показал, что для скважины диаметром до 100 мм и длиной 15 м ее отклонение от первоначального направления на выходе в различных типах грунтов в среднем составляет величину около 150 мм или 10 мм на 1 м длины (рис. 4).

Основываясь на результатах проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что выбранный способ корректировки траектории и предложенное конструктивное решение механизма отклонения пневмопробойника позволит компенсировать воздействие большинства случайных отклоняющих факторов и обеспечить выход скважины в заданную область подземного пространства. Кроме того, появляется возможность прокладки скважин с заведомо криволинейной траекторией. Таким образом, выбранный способ управления траекторией движения пневмопробойника потенциально соответствует предъявленным требованиям и является перспективным для его использования в практических целях.

Дополнительно, в ходе проведенных экспериментов, было произведено определение площади и расположения поверхности наиболее плотного контакта корпуса и его отклоняемой части с грун-

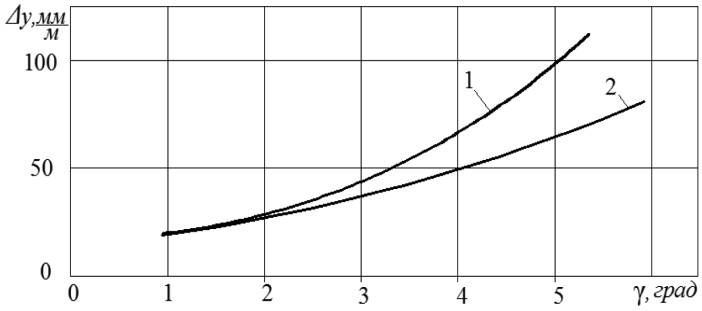

Рис. 3. Зависимость величины смещения корпуса на 1 м скважины от угла отклонения хвостовой части при показателе ударника ДорНИИ: 1 — С = 3÷4; 2 — С = 5÷6 [9]
Fig. 3. Deflection of body per 1 m of hole versus angle of rear at DorNII piercing machine performance: 1 — С = 3÷4; 2 — С = 5÷6 [9]

том (рис. 5). Для этого перед внедрением модели в грунт на корпус были нанесены продольные линии с помощью устойчивого белого пигмента. Зоны оставшихся после извлечения модели из грунта отрезков этих линий косвенно отражают картину распределения давления грунта на корпус макета и позволяют ориентировочно определить область, в которой находится центр поворота корпуса. Анализ расположения пятен наиболее плотного контакта корпуса с грунтом выявил, что точка поворота корпуса находится в некоторой области передней части образца. Однако полученные данные не позволяют определить расположение точки поворота с необходимой точностью, позволяющей построить математическую модель взаимодействия корпуса с грунтом.

Это необходимо для оптимизации параметров отклоняющего механизма и более точной оценки возможностей управляемых пневмопробойников различного типоразмера. С целью определения центра поворота корпуса пневмопробойника в грунте под действием поперечной силы, возникающей при повороте хвостовой части, был сконструирован стенд (рис. 6), представляющий собой бункер *1* с закрывающейся крышкой *2*, в которой имеются отверстия для стержней *3* и *4*.

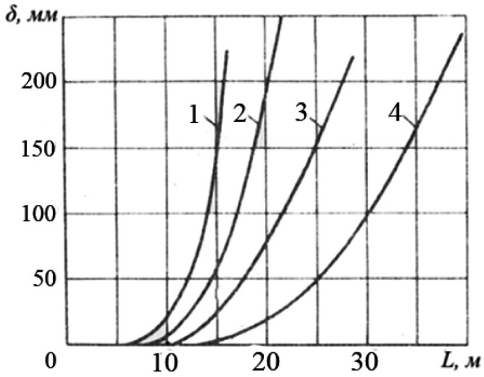

Рис. 4. Зависимость величины отклонения скважины от первоначального направления δ от длины скважины L при длине корпуса: 1 — 1000 мм, 2 — 1250 мм, 3 — 2000 мм, 4 — 2500 мм

Fig. 4. Deflection of hole from the initial direction, δ, versus the length of hole, L, at the body length: 1 — 1000 mm, 2 — 1250 mm, 3 — 2000 mm, 4 — 2500 mm

Стержни *3* и *4* используются для определения перемещений образца в грунте, а также для передачи силового воздействия на один из концов образца. На каждый стержень крепится шкала с градуировкой *5*, позволяющая проводить замеры перемещений с точностью до 0,1 мм.

В бункер *1* с заданным уплотнением загружается грунт до определенного уровня, после чего снимаются геометрические размеры образца *6* и укладывают его на грунт. Устанавливают проводящую трубку *7* на один конец образца

Рис. 5. Определение поверхности наиболее плотного контакта корпуса и отклоняемой его части с грунтом

Fig. 5. Determination of area of the firmest contact between soil and the machine body and deflected rear

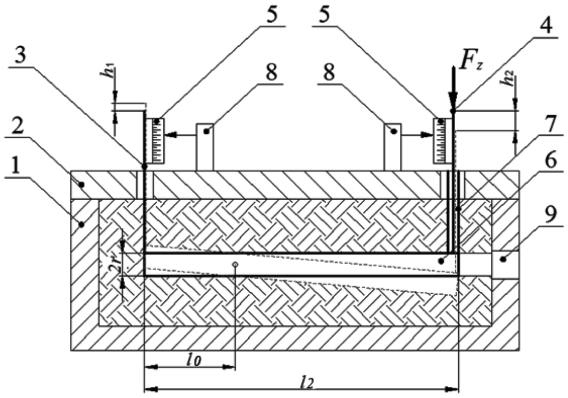

Рис. 6. Схема стенда для определения перемещений концов образца
Fig. 6. Layout of test bench for determining displacement of ends of a model

и стержень *3* на другой конец и засыпают оставшийся грунт с послойным уплотнением. Закрыв крышку *2*, вставляют нагрузочный стержень *4* в проводящую трубку *7* и закрепляют шкалы с градуировкой *5* на стержни. После этого устанавливают на крышку неподвижные метки *8* около каждой шкалы.

Перед приложением поперечной нагрузки фиксируют показания на шкалах *3* и *4* на каждом стержне, считая их нулевыми. После чего на нагрузочный стержень *4* прикладывается нагрузка, посредством установки гирь определенной массы, и после стабилизации положения образца записывают новые показания отметок на стержнях. На собранном стенде был проведен ряд экспериментов на образцах различного диаметра и длины.

При известных перемещениях h_1, h_2 и длине образца l_2, расстояние до точки поворота от ненагруженного конца рассчитывается по формуле (1):

$$l_0 = h_1 \cdot \frac{l_2}{h_1 + h_2} \qquad (1)$$

Рассчитав значение «*x*» при различной нагрузке, для каждого образца установлено некоторое относительное значение $n_{ср}$ — отношение длины l_0 (от ненагруженного конца до точки поворота) к общей длине образца l_2 (табл. 1).

$$n = \frac{l_2}{l_0} \qquad (2)$$

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что при различных размерах образца, среднее значение $n_{ср}$ будет находиться в пределах значений 4÷6 или аппроксимируя эти значения получаем $n_{ап}$ = 4,87. Разброс в значениях для различных образцов наиболее вероятно вызван неравномерностью уплотнения грунта.

Поскольку при отклоненной задней части пневмопробойника, отклоняющее усилие возникает в процессе его про-

Таблица 1

Расчет усредненного значения отношения длины образца к расстоянию «l_0»
Calculation of average ratio of length of model to distance «l_0»

Номер испытания №	1	2	3	4	5	6	7	
Диаметр образца *d*, мм	21	25	30	42	57	76	90	
Длина образца l_2, мм	275	170	242	385	286	418	520	$n_{ап}$
Среднее значение l_2/l_0 $n_{ср}$	4,10	4,22	4,91	5,97	5,65	4,87	4,40	4,87

Таблица 2

Расчет усредненного значения отношения длины образца к расстоянию «l_0» для образца № 2

Calculation of average ratio of length of model to distance «l_0» for model no. 2

Статика					Динамика				
h_1	h_2	$l_2 - l_0$	l_0	$n = l_2/l_0$	h_1	h_2	$l_2 - l_{0д}$	$l_{0д}$	$n_д = l_2/l_{0д}$
1,6	5,3	130,3	39,7	4,29	1,9	6,9	132,7	37,3	4,56
2,0	7,3	133,5	36,5	4,66	2,1	5,5	123,1	46,9	3,63
2,4	8,5	132,8	37,2	4,57	2,3	7,8	131,5	38,5	4,41
2,2	6	125,0	45,0	3,78	2,4	9	133,7	36,3	4,68
2,9	10	131,6	38,4	4,42	2,5	8,3	131,1	38,9	4,36
2,8	7,4	123,3	46,7	3,64	2,5	7	125,0	45,0	3,78
3,8	12	129,5	40,5	4,20					
			$n_{ср}$	4,22				$n_{ср}$	4,24

дольного перемещения (т.е. во время удара), то в естественных условиях на корпус будет действовать динамическое отклоняющее усилие. Поэтому потребовалось провести дополнительное исследование разворота образца № 2, при воздействии динамической нагрузки на один из его концов.

На этом же стенде была проведена серия экспериментов при динамической нагрузке одного конца образца, через стержень *4* с помощью ударника. После измерения перемещения образца в грунте, аналогично статическому воздействию, было определено положение центра поворота $l_{0д}$. Подставляя эту величину в формулу (2) вместо l_0, получено значение $n_д$ = 4,24. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таким образом установлено что точка поворота образца при динамическом воздействии, по сравнению со статическим, находится практически на том же расстоянии от ненагруженного конца образца, поэтому для упрощенного расчета может использоваться усредненный показатель $n_{ап}$ = 4,87 из табл. 1.

Полученный результат позволяет составить расчетную схему и провести расчет распределения реакций грунта на корпус пневмопробойника.

Представив корпус пневмопробойника как жесткую балку на упругом основании [11], получим схему силового воздействия на корпус пневмопробойника при его повороте в грунте от усилия F_y вокруг некоторой точки «*o*» (рис. 7). При нагружении слоя грунта сплошной нагруз-

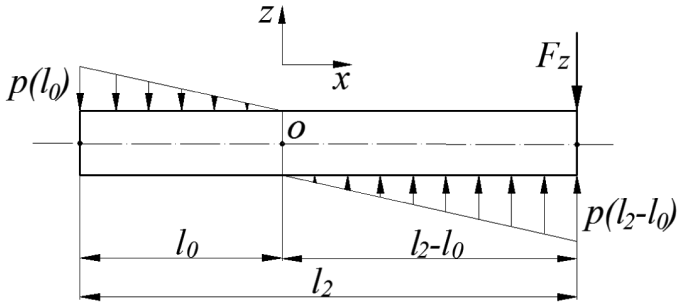

Рис. 7. Схема сил действующих на корпус пневмопробойника при его повороте от усилия Fz

Fig. 7. Scheme of forces applied to the body of pneumatic piercing tool under its turn under the force Fz

кой осадка грунта будет происходить за счет его уплотнения [12, 13]. Согласно [13], формула для определения осадки выглядит следующим образом:

$$S = \frac{h \cdot p \cdot \beta}{E_0}. \qquad (3)$$

где h — высота уплотняемого слоя грунта, м; p — давление на грунт, Па; β — переходный коэффициент от компрессионного модуля деформации E_0 к модулю общей деформации E.

Тогда дальнейшей задачей исследования является количественное определение зависимости между величиной усилия F_z и углом поворота корпуса пневмопробойника с учетом свойств грунта.

Дальнейшее исследование, на основе представленной расчетной схемы, может использоваться для построения математической модели.

В результате появляется возможность провести оптимизацию параметров отклоняющего механизма и более точную оценку возможностей управляемых пневмопробойников различного типоразмера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Потапенко А.* Особенности горизонтального бурения. URL: http://www.tehsovet.ru / article-2012-12-3-1468 (дата обращения 02.11.2016).

2. *Seiki Takano, Kentaro Hayashi, Kouki Zen, Rouzbeh Rasouli*. Controlled Curved Drilling Technique in the Permeation Grouting Method for Improvement Works of an Airport in Operation // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 143 — С. 539—547.

3. *Yao Ningpinga, Zhang Jie, Jin Xinga, Huang Hanjinga*. Status and Development of Directional Drilling Technology in Coal Mine // Procedia Engineering. — 2014. — Vol. 73. — pp. 289—298.

4. *Shadrina A., Saruev L., Vasenin S.* The technology improvement and development of the new design-engineering principles of pilot bore directional drilling // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 43 (2016) 012068. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012068.

5. *Рыбаков А.П.* Основы бестраншейных технологий. — М.: Пресс Бюро № 1, 2005. — 304 с.

6. *Суднишников Б.В., Костылев А.Д., Тупицин К.К.* Пневмопробойники в строительстве и горном деле // ФТПРПИ. — 1970. — № 2. — С. 44—49.

7. *Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Сырямин Н.Д., Чещин Д.О.* Патент РФ на ПМ № 156648. Устройство для изменения направления движения пневмоударной машины; заявитель и обладатель ИГД СО РАН. № 2015115184/03; заявл. 22.04.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.

8. *Данилов Б.Б., Чещин Д.О.* Перспективный способ проходки скважин по заданной траектории / Комплексные проблемы техносферной безопасности. Безопасный город. Ч. II, сборник научных статей. — Воронеж, 2015. — С. 106—110.

9. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 19 с.

10. *Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др.* Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. — 218 с.

11. *Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В. и др.* Механика грунтов, основания и фундаменты. — М.: АСВ, 1994. — 527 с.

12. *Norhaliza W., Ismail B., Azhar A.T.S., Nurul N.J.* Shear Strength of Remoulding Clay Samples Using Different Methods of Moulding. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 136 (2016) 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/136/1/012018.

13. *Дорошкевич Н.М., Клейн Г.К., Смиренкин П.П.* Основания и фундаменты: учебник для техникумов. 4-е изд., перераб. и доп.. — М.: Высшая школа, 1972. — 256 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Данилов Борис Борисович[1] — доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: bbdanilov@mail.ru,
Речкин Александр Аркадьевич[1] — младший научный сотрудник, e-mail: lexxer68@gmail.com,
Чещин Дмитрий Олегович[1] — младший научный сотрудник, e-mail: dimixch@mail.ru,
[1] Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 7, pp. 116–123.

Experimental positioning of controllable pneumatic piercing machine pivot

Danilov B.B.[1], Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher,
e-mail: bbdanilov@mail.ru,
Rechkin A.A.[1], Junior Researcher, e-mail: lexxer68@gmail.com,
Cheshchin D.O.[1], Junior Researcher, e-mail: dimixch@mail.ru,
[1] Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

Abstract. In focus of the study is long shallow hole-making in soil by the method of piercing. It is shown that the most efficient equipment for implementing this method are pneumatic piercing tools. The further improvement of vibro-impact piercing is impeded by insufficient accuracy of underground drilling in terms of reaching a pre-set point. It is suggested to overcome the difficulty by engineering controllable pneumatic piercing machines capable to change the motion path upon operator's command. In the framework of handling the set task, recommendations are made for selecting an alignment method for pneumatic piercing machine path, and basic requirements are laid down on a deflection device design. A new layout of the motion path changing mechanism is proposed and its mode of operation is described. The article presents the test results obtained on a prototype of a pneumatic piercing device with the deflectable rear and the data on experimental study into turning the pneumatic piercing machine body under deflecting force in soil.

Key words: hole, pneumatic piercing tool, trenchless technologies, curved holes, pneumatic piercing tool path alignment.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-116-123

REFERENCES

1. Potapenko A. *Osobennosti gorizontal'nogo bureniya* [Features of horizontal drilling]. URL: http://www.tehsovet.ru /article-2012-12-3-1468 (accessed 02.11.2016).

2. Seiki Takano, Kentaro Hayashi, Kouki Zen, Rouzbeh Rasouli. Controlled Curved Drilling Technique in the Permeation Grouting Method for Improvement Works of an Airport in Operation. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143 C. 539—547.

3. Yao Ningpinga, Zhang Jie, Jin Xinga, Huang Hanjinga. Status and Development of Directional Drilling Technology in Coal Mine. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 73. pp. 289—298.

4. Shadrina A., Saruev L., Vasenin S. The technology improvement and development of the new design-engineering principles of pilot bore directional drilling. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 43 (2016) 012068. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012068.

5. Rybakov A.P. *Osnovy bestransheynykh tekhnologiy* [Basics of trenchless technology], Moscow, Press Byuro no 1, 2005, 304 p.

6. Sudnishnikov B.V., Kostylev A.D., Tupitsin K.K. Pnevmoproboyniki v stroitel'stve i gornom dele [Pneumatic punch in the construction and mining]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1970, no 2, pp. 44—49. [In Russ].

7. Smolyanitskiy B.N., Danilov B.B., Syryamin N.D., Cheshchin D.O. *Patent RU 156648*, 10.11.2015.

8. Danilov B.B., Cheshchin D.O. Perspektivnyy sposob prokhodki skvazhin po zadannoy traektorii [A promising method of hole drilling along a predetermined path]. *Kompleksnye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti. Bezopasnyy gorod*, part II, sbornik nauchnykh statey. Voronezh, 2015, pp. 106—110. [In Russ].

9. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik. GOST 5180-84* [Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics. State Standart 5180-84], Moscow, Izd-vo standartov, 1993, 19 p.

10. Gurkov K.S., Klimashko V.V., Kostylev A.D. *Pnevmoproboyniki* [Pneumatic testers], Novosibirsk, IGD SO AN SSSR, 1990, 218 p.

11. Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamenskiy V.V. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Soil mechanics, bases and foundations], Moscow, ASV, 1994, 527 p.

12. Norhaliza W., Ismail B., Azhar A.T.S., Nurul N.J. Shear Strength of Remoulding Clay Samples Using Different Methods of Moulding. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 136 (2016) 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/136/1/012018.

13. Doroshkevich N.M., Kleyn G.K., Smirenkin P.P. *Osnovaniya i fundamenty: uchebnik dlya tekhnikumov*. 4-e izd. [Bases and foundations: textbook for technical schools, 4th edition], Moscow, Vysshaya shkola, 1972, 256 p.