ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):258–264
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.24.05 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_258

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АВАРИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИХВАЧЕННОЙ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЕ

А. Д. Симисинов[1], Е. В. Волков[2], Д. И. Симисинов[2]

[1] УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
[2] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Для технологии горизонтально-направленной прокладки трубопроводов характерны частые аварии, сопровождающиеся потерей в скважинах дорогостоящего оборудования. Для извлечения части бурильной колонны в наклонно-направленных и горизонтальных скважинах предложен подвесной аварийный инструмент. Высвобождение прихваченной колонны обеспечивается бурением параллельно-сопряженной скважины до интервала прихвата бурильной колонны с одновременной разгрузкой зоны сжатия породы прихваченной бурильной колонны. Основной задачей при бурении параллельно-сопряженной скважины является обеспечение динамического равновесия рабочего органа установки, т.е. недопущение отклонение оси бура от траектории движения. По результатам динамического расчета и конструктивных решений установлено, что для обеспечения устойчивости бурения скважин в заданном направлении необходимо чтобы отношение моментов, создаваемых на буре и кольцевой коронке, было пропорционально отношению площади бурения этих инструментов. Применимость инструмента подтверждена испытаниями опытного образца подвесного аварийного бурового агрегата.

Ключевые слова: горизонтально-направленное бурение; ликвидация прихвата инструмента; буровой аварийный инструмент; параллельная скважина; режимы бурения.

Благодарности: Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» по теме № 1021060707960-7-2.3.1.

Для цитирования: *Симисинов А. Д., Волков Е. В., Симисинов Д. И.* Обоснование конструкции аварийного инструмента для извлечения прихваченной бурильной колонны в наклонно-направленной скважине // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11-1. — С. 258–264. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_258.

Justification of emergency tool design for removal of drill string stuck in intentionally deviated wells

A. D. Simisinov[1], E. V. Volkov[2], D. I. Simisinov[2]

[1] Ural Federal University named after the First President of Russian B. N. Eltsin, Yekaterinburg, Russia;
[2] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: Horizontal directional drilling is often accompanied with accidents, with loss of expensive equipment in wells. A hook emergency tool is proposed for the removal of drill strings from intentionally deviated and horizontal wells. Release of a stuck drill string involves

© А. Д. Симисинов, Е. В. Волков, Д. И. Симисинов. 2021

drilling of a parallel close-spaced well down to the places of the drill string sticking with the concurrent relaxation of the compression zone surrounding the stuck drill string. The key mission of the parallel closed-space drilling is dynamic equilibrium of the tool, i.e. prevention of the drill axis departure from the set path. The dynamic analyses and designs show that steady-state drilling in the preset direction requires that the ratio of moments at the drill and annular bit is proportional to the ratio of their drilling areas. Applicability of the tool is proved by the tests of the prototype hook emergency drilling tool.

Key words: horizontal directional drilling, sticking elimination, emergency drilling tool, parallel well, drilling modes.

Acknowledgments: The study was carried out in accordance with the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia to perform research for the Ural State Mining University on the topic No. 1021060707960-7-2.3.1.

For citation: Simisinov A. D., Volkov E. V., Simisinov D. I. Justification of emergency tool design for removal of drill string stuck in intentionally deviated wells . *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):258–264. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_258.

Введение

В настоящее время при строительстве инженерных коммуникаций бестраншейным способом широко применяется горизонтально-направленное бурение скважин (ГНБ). Для технологии ГНБ характерны частые аварии, сопровождающиеся потерей в скважинах дорогостоящего бурового и навигационного оборудования [1, 2, 3]. Продолжительные попытки устранения аварий приводят к увеличению степени прихвата и потери всей или части бурильной колонны. [4—7].

Метод извлечения прихваченной бурильной колонны в наклонно-направленной скважине.

На практике при возникновении прихвата бурильной колонны применяется для высвобождения трубы используются [8 — 10]:

– выталкивание колонны буровой установкой обратной тягой;

– применение пневмоударной установки в сочетании с тяговым усилием установки ГНБ;

– разработки участка прихвата открытым способом;

– отсечение участка трубы от буровой колонны и вытягивание на себя установкой ГНБ колонны буровых труб.

Универсальной технологии ликвидации прихватов при ГНБ не существует.

Для извлечения части бурильной колонны в наклонно-направленных и горизонтальных скважинах предложен подвесной аварийный инструмент [11].

Подвесной аварийный буровой агрегат (рис. 1) состоит из корпуса *1* с жестко установленной направляющей втулкой *2* и шпинделем *3*, установленным на подшипниках параллельно оси втулки *2*. На шпинделе установлен бур *4*, оснащенный гидравлическими соплами и гидромониторная головка *5*.

Авария ликвидируется путем бурения параллельно-сопряженной скважины. Параллельно-сопряженная бурильная колонна, оснащенная буром и гидромониторной головкой, соединяется жестко и соосно с подвесной направляющей втулкой, оснащенной зубцами, скользящей по прихваченной бурильной колонне.

Высвобождение прихваченной колонны обеспечивается бурением параллельно-сопряженной скважины до интервала прихвата бурильной колонны с одновременной разгрузкой зоны сжатия породы прихваченной бурильной колонны. Прихваченная бурильная колонна оседает под соб-

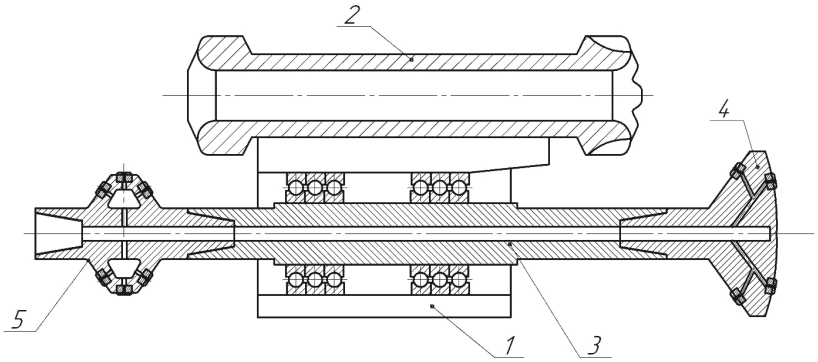

Рис. 1. Подвесной аварийный буровой агрегат: 1 — корпус, *2* — направляющая втулка, *3* — шпиндель, *4* — бур, *5* — гидромониторная головка
Fig. 1. Suspended emergency drilling tool: 1 — body, *2* — guide sleeve, *3* — spindle, *4* — drill, *5* — jet head

ственным весом в разбуренный забой, образованный двумя параллельно-сопряженными скважинами и извлекается назад.

Недостатком инструмента [11] является то, что направляющая втулка, перемещается по прихваченной бурильной колонне под действием только осевой нагрузки, и не может выполнять разрушение кольцевого забоя, образованного прихваченной бурильной колонной и направляющей втулкой. Поэтому скорость перемещения направляющей втулки будет зависеть от мощности буровой установки, диаметра и длинны извлекаемой колонны, буримости пород и при неблагоприятном сочетании условий бурения параллельно-сопряженной скважины, скорость может упасть вплоть до прекращения бурения.

Наличие крутящего момента у бура будет приводить к развороту бура и параллельно-сопряженной скважины вокруг направляющей втулки и соответственно прихваченной колонны.

Основной задачей при бурении параллельно-сопряженной скважины является обеспечение динамического равновесия рабочего органа установки, т.е. недопущение отклонение оси бура от траектории движения.

В конструкции [12] инструмент оснащен направляющей втулкой с кольцевой коронкой и связанной зубчатой передачей с параллельно-сопряженной бурильной колонной (рис. 2). В этом варианте подвесной аварийный буровой агрегат состоит из корпуса *1* с направляющей втулкой *2* и шпинделем *3*, установленным на подшипниках параллельно оси втулки *2*. На шпинделе установлен бур *4*, оснащенный гидравлическими соплами и гидромониторная головка *5*. Направляющая втулка оснащена кольцевой коронкой *6* и связана зубчатой передачей *7* с шпинделем *3*.

Бур вращается с угловой скоростью ω под действием крутящего момента M_1, передаваемого приводом. К нему перпендикулярно плоскости резания приложено толкающее усилие *F*.

В первом приближении, руководствуясь гипотезами сплошности, однородности и изотропности, представляется целесообразным применение энергетического подхода к определению динамических характеристик бура.

Обозначим условие динамического равновесия: $\omega_{OC} = 0$. Руководствуясь дифференциальной формой теоремы об изменении кинетической

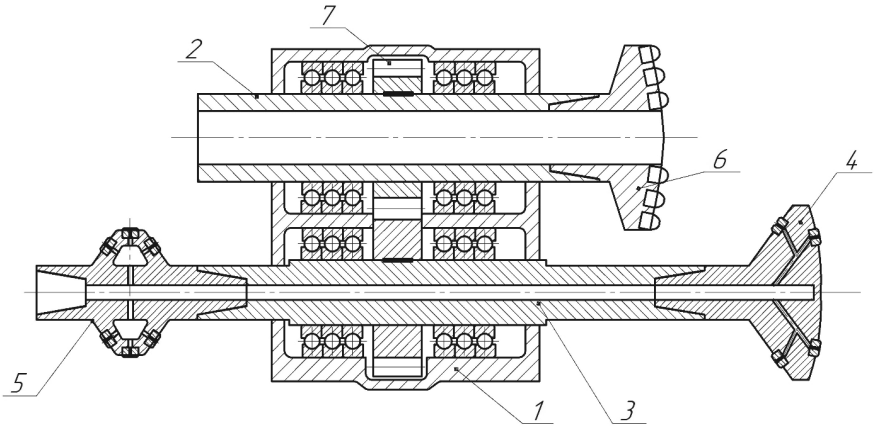

Рис. 2. Подвесной аварийный буровой агрегат с кольцевой коронкой: 1 — корпус, *2 —* направляющая втулка, *3 —* шпиндель, *4 —* бур, *5 —* гидромониторная головка, *6 —* кольцевая коронка, *7 —* зубчатая передача

Fig. 2. Hook emergency drilling tool with annular drill bit: 1 — housing; *2 —* guide bush; *3 —* drive rod; *4 —* drill; *5 —* hydromotor drill head; *6 —* annular bit; *7 —* tooth gear

энергии $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e) + \sum N(\vec{F}_k^i)$, где T — кинетическая энергия системы; $\sum N(\vec{F}_k^e)$, $\sum N(\vec{F}_k^i)$ — сумма мощностей, соответственно, внешних и внутренних сил, определим кинетическую энергию бура и сумму мощностей от внешних крутящих моментов (рис. 3).

Рассматриваемая система является неизменяемой и, следовательно, сумма мощностей внутренних сил равна нулю. Движение бура в плоскости резания — вращательное. Поэтому кинетическая энергия бура определяется согласно выражению:

$$T = \frac{1}{2} m i^2 \omega^2, \qquad (1)$$

где i — радиус инерции, ω — угловая скорость вращения, m — масса бура. Мощности от крутящего момента $N(M_1) = M_1\omega$ и момента сопротивления резанию $N(M_{CP}) = -M_{CP}\omega$, соответственно. Тогда изменения энергии вращательного движения в зависимости от внешних силовых факторов принимает вид:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} m i^2 \omega^2\right) = M_1\omega - M_{CP}\omega. \qquad (2)$$

Продифференцируем левую часть выражения (2) по времени, получим:

$$m i^2 \varepsilon = M_1 - M_{CP}, \qquad (3)$$

где ε — угловое ускорение бура.

Выражение (3) представляет собой дифференциальное уравнение вращательного движения бура в плоскости резания. Стоит отметить, что в выражении (3) M_{CP} — это главный момент от всех внешних силовых факторов относительно оси вращения бура. В установившемся режиме $\varepsilon = 0$, тогда из выражения (3) следует, что $M_1 = M_{CP}$.

Результаты

Основываясь на результатах динамического расчета и конструктивных решениях, приведенных выше, для обеспечения устойчивости бурения скважин в заданном направлении необходимо чтобы отношение моментов, создаваемых на буре и кольцевой коронке M_1 и M_2 соответственно, было

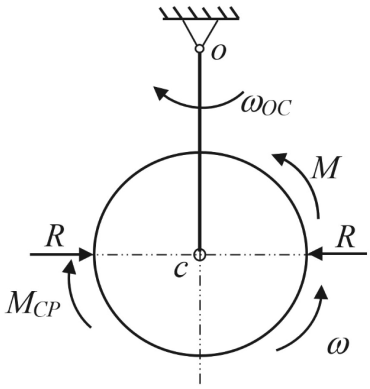

Рис. 3. Расчетная схема усилий, действующих на бур
Fig. 3. Calculation model of forces on drill bit

пропорционально отношению площади бурения этих инструментов S_1 и S_2. Динамическое равновесие системы (буровой колонны) достигается путем выполнения передаточного отношения i_{21}:

$$S_1/S_2 = M_1/M_2 = z_1/z_2 = i_{21}, \qquad (4)$$

где z_1 и z_2 — число зубьев шестерен зубчатой передачи от бура и от кольцевой коронок соответственно [12].

Выводы

Использование предлагаемого подвесного аварийного бурового агрегата (рис. 2) позволяет извлекать прихваченную бурильную колонну и буровой инструмент в наклонно-направленных и горизонтальных скважинах, снизить технические и экономические риски.

Применимость инструмента подтверждена испытаниями опытного образца подвесного аварийного бурового агрегата бурением параллельно-сопряженной скважины для извлечения прихваченной бурильной колонны диаметром 168 мм. Проходка опытного образца агрегата составила 90 м за три рабочих смены.

Стоит отметить, что предложенная методика по определению динамических характеристик буровой коронки, основанная на энергетическом подходе, позволит подобрать привод необходимой мощности исходя из горно-технических условий, так как момент сопротивления резанию является функцией буримости породы, а также зависит от величины толкающего усилия. Все это позволит дать рекомендации по мощности привода в заданных условиях бурения и соответственно приведет к уменьшению энергозатрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liangxue Cai, Maria Anna Polak* A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2019, — Vol. 83, pp. 313—323. 10.1016/j.tust.2018.09.014.

2. *Gomaa M. A.K., Elshafei M.*, *Saif AW. A., Al-Majed A. A.* Autonomous Trenchless Horizontal Directional Drilling. In: *Ghommam J.*, *Derbel N.*, *Zhu Q.* (eds) New Trends in Robot Control. Studies in Systems, Decision and Control. — 2020, — vol 270. available at: www.doi.org/10.1007/978—981—15—1819—5_3/ (обращение 15.05.2021)

3. *Tervydis Paulius, Jankuniene Ruta.* Horizontal directional drilling pilot bore simulation. Turkish journal of electrical engineering & computer sciences. — 2017, — № 25, pp. 3421—3434. doi.org/10.3906/elk-1606—200.

4. *Rabiei Montazar, Ping Kuo, Chang Sonny, Gelinas Marc.* Analysis and Design of Pipes Installed via Direct Pipe ® Technology. Proc. of Conference: NASTT No-Dig Show (2018). — Palm Springs. CA. March 25—29 available at: www.researchgate.net/publication/324654924_Analysis_and_Design_of_Pipes_Installed_via_Direct_Pipe_R_Technology (обращение 15.05.2021)

5. *Stangl G.*, Levings, R. Horizontal Directional Drilling (HDD) systems for pilot bore drilling in mixed soil conditions and rock. 30th International No-Dig Conference and Exhibition. — 2012, No-Dig Sao Paulo 2012, pp. 345—366.

6. *Саруев Л. А.*, *Шадрина А. В.*, *Саруев А. Л.*, *Васенин С. С.*, *Пахарев А. В.* Перспективы развития технологии и техники горизонтально-направленного бурения пилотных скважин для бестраншейной прокладки трубопроводов. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019, № 330 (4). — С. 89—97. doi.org/0.18799/24131830/2019/4/232

7. *Торопов Е. С.*, *Торопов В. С.*, *Земенков Ю. Д.*, *Сероштанов И. В.* Осложнения при сооружении переходов трубопроводов методом горизонтально направленного бурения // Территория Нефтегаз. — 2015, — № 5. — С. 32—37.

8. Торопов, В. С., Пономарева, Т. Г., Торопов, С. Ю., Торопов, Е. С. Количественная оценка изменений в системе трубопровод-скважина при возникновении аварийной ситуации в горизонтальном направленном бурении //Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2016. — №. 5. — С. 71—77.

9. *Биктимирова К. А.* Инженерно-геологическое обеспечение горизонтально-направленного бурения при строительстве различных подземных коммуникаций в условиях мегаполисов // ГИАБ. — 2016, — № 12. — С. 342—348.

10. *Кирьянов И. Е.*, *Земенков Ю. Д.*, *Дорофеев С. М.*, *Торопов В. С.* Ликвидация аварийных ситуаций при прокладке трубопроводов методом горизонтального направленного бурения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2015, — № 2. — С. 91—96. doi.org/10.31660/0445—0108—2015—2-91—96

11. Патент РФ № 2662833 25.07.2017 Симисинов И. Л., Симисинов Д. И., Лобанов Н. В., Гаков А. Л., Семенов А. А. Подвесной аварийный буровой агрегат для извлечения прихваченной бурильной колонны. 2018 Бюл. № 22.

12. *Симисинов И. Л.*, *Симисинов Д. И.*, *Симисинов А. Д.*, *Волков Е. Б.* Аварийный инструмент для извлечения прихваченной бурильной колонны в наклонно-направленной скважине. Пат. № 2 720 834, заявка № 2019125708 от 15.08.2019. Опубликовано: 13.05.2020 Бюл. № 14. ГИАБ

REFERENCES

1. Liangxue Cai, Maria Anna Polak A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2019, Vol. 83, pp. 313—323. 10.1016/j.tust.2018.09.014.

2. Gomaa M. A.K., Elshafei M., Saif AW. A., Al-Majed A. A. Autonomous Trenchless Horizontal Directional Drilling. In: Ghommam J., Derbel N., Zhu Q. (eds) New Trends in Robot Control. Studies in Systems, Decision and Control. 2020, vol 270. available at: www.doi.org/10.1007/978—981—15—1819—5_3/ (accessed 15.05.2021).

3. Tervydis Paulius, Jankuniene Ruta. Horizontal directional drilling pilot bore simulation. *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*. 2017, no. 25, pp. 3421—3434. doi.org/10.3906/elk-1606—200.

4. Rabiei Montazar, Ping Kuo, Chang Sonny, Gelinas Marc. Analysis and Design of Pipes Installed via Direct Pipe ® Technology. Proc. of Conference: NASTT No-Dig Show (2018). Palm Springs. CA. March 25—29. available at: www.researchgate.net/publication/324654924_Analysis_and_Design_of_Pipes_Installed_via_Direct_Pipe_R_Technology (accessed 15.05.2021)

5. Stangl G., Levings, R. Horizontal Directional Drilling (HDD) systems for pilot bore drilling in mixed soil conditions and rock. 30th International No-Dig Conference and Exhibition (2012), No-Dig Sao Paulo 2012, pp. 345—366.

6. Saruev L. A., Shadrina A. V., Saruev A. L., Vasenin S. S., Pakharev A. V. Prospects for the development of technology and techniques for horizontal directional drilling of

pilot wells for trenchless pipeline laying. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*. 2019, 330 (4), pp. 89 — 97. doi.org/0.18799/24131830/2019/4/232 [In Russ]

7. Toropov Ye.S., Toropov V. S., Zemenkov Yu.D., Seroshtanov I. V. Complications in construction of pipe crossings applying horizontal directional drilling. *Territorija «NEFTEGAZ» Oil and Gas Territory*. 2015, no. 5, pp. 32 — 37. [In Russ]

8. Toropov V. S. et al. Quantitative assessment of changes in the pipeline-well system in the event of an emergency in horizontal directional drilling. *Oil and Gas Studies*. 2016, 5, pp. 71 — 77. [In Russ]

9. Biktimirova K. A. Geological engineering support horizontal directional drilling in construction of various underground utilities in cities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016. no. 12, pp. 342 — 348. [In Russ]

10. Kiryanov I. E., Zemenkov Yu.D., Dorofeev S. M., Toropov V. S. Emergency response in the pipeline construction by horizontal directional drilling. *Oil and Gas Studies*. 2015, no. 2, pp. 91 — 96. doi.org/10.31660/0445 — 0108 — 2015 — 2-91 — 96 [In Russ]

11. Simisinov I. L., Simisinov D. I., Lobanov N. V. Gakov A. L., Semenov A. A. *Patent RU 2662833 C1,* 31.07.2018 [In Russ]

12. Simisinov I. L., Simisinov D. I., Simisinov A. D., Volkov E. B. *Patent RU 2720834, C1,* 31.07.2018 13.05.2020 [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Симисинов Антон Денисович[1] — студент;
Волков Евгений Борисович[2] — канд. техн. наук, заведующий кафедрой технической механики, доцент;
Симисинов Денис Иванович[2] — канд. техн. наук, заведующий кафедрой эксплуатации горного оборудования, доцент, e-mail: 7sinov@mail.ru;
[1] УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
[2] Уральский государственный горный университет, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Simisinov A. D.[1], Student;
Volkov E. B.[2], Cand. Sci. (Eng.), Head of the Engineering Mechanics Department, Associate Professor;
SimisinovD. I.[2], *Head* of the Mining Equipment Operation Department, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), e-mail: 7sinov@mail.ru;
[1] Ural Federal University named after the First President of Russian B. N. Eltsin, Yekaterinburg, Russia;
[2] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 03.09.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 25.05.2021; received after the review 03.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.