



## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСА ОСЕВОГО УДАРА ДОЛОТА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Двойников В.М., Растворова И.И., Юртаев С.Л.

Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

vladimir24032000@gmail.com

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Фактическая нагрузка на долото состоит из динамической и статической нагрузки. Высокая степень неоднородности горной породы, а также недостаточная объективность оценки напряженно-деформированного состояния бурового инструмента приводит к невозможности определения фактической нагрузки на долото и, как следствие, к снижению эффективности бурения скважин. На практике в телеметрической системе устанавливается трех осевой акселерометр для измерения частоты колебаний бурового долота. Однако измерительные приборы, способные определять объективный импульс ударов, в настоящее время отсутствуют. ЦЕЛЬ данной работы является разработка измерительной системы для определения импульса осевых колебаний при бурении скважин на основе динамики слабо сжимаемых жидкостей МЕТОДЫ. В рамках работы проанализированы недостатки существующих измерительных систем, применяемых в роторном бурении скважин. Получена расчетная формула корреляции давления жидкости в герметичной гидравлической системе и динамики внешнего осевого воздействия на систему. Разработан прототип измерительной системы, основанный на теоретически полученных математических закономерностях. Для измерительной системы разработана программа, в которой реализован комбинированный фильтр, повышающий качество выходных данных, а также метод взаимной корреляции для выделения отдельных ударов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Предложена методология для измерения импульса осевых ударов на основе гидравлического цилиндра, устанавливаемого в непосредственной близости к долоту, и комплекса датчиков для измерения состояния жидкости внутри цилиндра. Была разработана модель измерительной системы

**Ключевые слова:** бурение; вибрации; измерительная система; MWD; гидродинамика; импульс удара.

**Для цитирования:** Двойников В.М., Растворова И.И., Юртаев С.Л. Исследование измерительной системы для определения импульса осевого удара долота в процессе бурения скважин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 14-24. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-14-24.

## DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT SYSTEM FOR DETERMINING THE AXIAL IMPACT PULSE OF A DRILL BIT IN THE PROCESS OF WELL DRILLING

Dvoynikov V.M., Rastvorova I.I., Yurtaev S.L.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

vladimir24032000@gmail.com

**Abstract:** RELEVANCE. The actual load on the drill bit consists of dynamic and static loads. The high degree of heterogeneity of the rock, as well as the insufficient objectivity in assessing the stress-strain state of the drilling tool, leads to the inability to determine the actual load on the bit and, consequently, to a decrease in the efficiency of well drilling. In practice, a three-axis accelerometer is installed in the telemetry system to measure the frequency of vibrations of the drill bit. However, measuring devices capable of determining the objective impact pulse are currently lacking. THE PURPOSE of this work is to develop a measurement system for determining the pulse of axial vibrations during well drilling based on the dynamics of weakly compressible fluids METHODS. This work analyzes the shortcomings of existing measurement

*systems used in rotary drilling of wells. A calculation formula has been obtained that correlates the pressure of the fluid in a sealed hydraulic system with the dynamics of external axial forces acting on the system. A prototype of the measurement system has been developed based on theoretically derived mathematical patterns. A program has been created for the measurement system, which implements a low-frequency filter to enhance the quality of output data, as well as a method of mutual correlation to isolate individual impacts. RESULTS. A methodology for measuring the pulse of axial impacts has been proposed based on a hydraulic cylinder installed in close proximity to the bit, along with a set of sensors to measure the state of the fluid inside the cylinder. A model of the measurement system has been developed.*

**Keywords:** *drilling; vibrations; measurement system; MWD; hydrodynamics; impact pulse.*

**For citation:** Dvoynikov V.M., Rastvorova I.I., Yurtaev S.L. Development of a measurement system for determining the axial impact pulse of a drill bit in the process of well drilling. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 14-24. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-14-24.

### **Введение (Introduction)**

Фактическая нагрузка на долото состоит из динамической и статической нагрузки. Высокая степень неоднородности горной породы [1], а также недостаточная объективность оценки напряженно-деформированного состояния бурового инструмента приводит к невозможности определения фактической нагрузки на долото и, как следствие, к снижению эффективности бурения скважин [2].

Например, при роторном бурении скважин с использованием гидравлических забойных двигателей могут возникать неконтролируемые колебания бурильной колонны. Колебания вызывают мгновенную и неконтролируемую вибрацию, в том числе продольные удары компоновки низа бурильной колонны (КНБК) о породу, что приводит к резкому падению механической скорости бурения, потере продольной устойчивости инструмента и риску возникновения аварийных ситуаций в скважине.

На практике в телеметрической системе устанавливается трехосевой акселерометр для измерения частоты колебаний бурового долота. Однако измерительные приборы, способные определять объективный импульс ударов, в настоящее время отсутствуют [3, 4].

Эмпирические зависимости, определяющие технико-технологические параметры бурения скважин, до сих пор не сведены в единую базу данных. Это связано с отсутствием корреляционных алгоритмов, способных связать статическую и динамическую составляющие нагрузки на долото.

Целью данной работы является разработка измерительной системы для определения импульса осевых колебаний при бурении скважин на основе динамики слабо сжимаемых жидкостей.

Научная значимость работы состоит в применении нового подхода измерения осевых колебаний в процессе роторного бурения скважин, который позволяет количественно оценить значения импульса продольных ударов. Новизна подхода состоит в оценке динамических и статических свойств жидкости для описания поведения механизмов в условиях высокочастотных вибраций.

Практическая значимость работы заключается в повышении количества измеряемых параметров осевых ударов в процессе роторного бурения, что позволит своевременно изменять режимные параметры бурения и, как следствие, продлит срок службы дорогостоящего бурового оборудования. Также, собранная информация об импульсе мгновенных осевых ударов позволит выявить недостатки используемого на сегодняшний день бурового инструмента и модернизировать его в дальнейшем.

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Существующие системы MWD решают проблему компенсации критического ускорения вибрации и колебаний в компоновке низа бурильной колонны (КНБК) [5]. Ведущими производителями, такими как Schlumberger, Halliburton и Baker Hughes, разработаны сложные системы для мониторинга вибрации и оптимизации производительности бурения. Например, система мониторинга производительности бурения Schlumberger использует акселерометры для мониторинга частот колебаний и смягчения критических вибраций [6]. Однако эти системы в первую очередь сосредоточены на измерении частот вибрации и ускорений, а не на прямом измерении

импульса ударов. Baker Hughes также предлагает свою платформу Digital Solutions, которая анализирует данные с различных датчиков для оценки состояния бурового оборудования [7], но она также основана на гироскопе и акселерометре.

Системы, которые в настоящее время используются, повышают общую безопасность и эффективность буровых работ, но они не обеспечивают точных измерений импульса осевых ударов. Это подчеркивает необходимость проведения исследований и разработок в области мониторинга процесса бурения, в частности, создания измерительных систем, способных точно регистрировать динамику осевых ударов во время буровых работ.

Для снижения колебаний, регистрируемых скважинными датчиками в телеметрической системе MWD (Measurement While Drilling), и стабилизации бурового инструмента вносятся коррективы в частоту вращения верхнего привода или нагрузку на долото [8-10]. Однако точной методики определения динамической составляющей фактической нагрузки на долота при ударах о забой и стенки скважины не существует [11-13].

На сегодняшний день существует множество разработок, касающихся динамики жидкости в различных условиях. Наиболее полно неизотермическое движение вязкой сжимаемой жидкости описывается следующими уравнениями [14-16]:

1. Уравнения Навье-Стокса (3 уравнения для компонент вектора скорости  $u$ ,  $v$ ,  $w$ );
2. Уравнение неразрывности (для давления  $p$ ) [17];
3. Уравнение конвективной теплопроводности (для расчета температуры  $T$ );
4. Уравнение состояния, которое связывает  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$  [18, 19].

Глубокое понимание и точное измерение динамических и статических свойств жидкости может позволить применить известные закономерности для разработки методологии измерения динамической составляющей нагрузки на долото в процессе роторного бурения скважин.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Предлагается разработать методологию для измерения импульса осевого удара долота в процессе бурения скважин на основе герметичной камеры, заполненной слабо сжимаемой жидкостью, и подвижного поршня. Оценка состояния жидкости внутри камеры в определенные моменты времени позволит получить информацию о динамике при внешнем воздействии, а именно об осевом воздействии на подвижный поршень.

Расчет динамики жидкости по описанным выше уравнениям является сложным и требует большое количество вычислительных мощностей. Поскольку в системе используется слабо сжимаемая жидкость, потерями энергии на выполнение жидкостью механической работы можно пренебречь. По причине герметичности камеры и отсутствии высокой скорости потока жидкости, допускаем, что жидкость в камере является неразрывной, а также что жидкостью не совершается работа по преодолению силы трения.

Получим уравнение для расчета импульса внешнего удара, приложенного к подвижному поршню, с учетом описанных допущений.

В момент удара давление на поршень площадью  $A$  создает силу:

$$F(t) = P(t) \cdot A \quad (1)$$

где  $F(t)$  – сила удара,  $P(t)$  – давление, оказываемое на поршень.

По Второму закону Ньютона импульс силы  $J$ , передаваемый поршню за время  $t$  равен интегралу силы по времени. Подставив уравнение 1, получим:

$$J = \int_0^{\Delta t} F(t)dt = A \cdot \int_0^{\Delta t} P(t)dt \quad (2)$$

По закону сохранения импульса, импульс, переданный жидкости равен импульсу внешнего осевого удара. Таким образом, получена зависимость импульса осевого удара и динамических свойств жидкости в герметичной камере для слабо сжимаемой жидкости.

Для измерения импульса осевого удара с помощью описанной методологии необходимо разработать измерительную систему, которая будет обеспечивать стабильное, высокоскоростное и точное получение информации о состоянии жидкости в герметичной камере (давление, температура, объем).

В качестве датчика температуры принято решение использовать полупроводниковый термистор, поскольку особенностью данных датчиков является скорость отклика и чувствительность [20]. Применение данного типа температурных датчиков позволит моментально определить изменение температуры в момент удара и, как следствие, оценить потери на теплообмен в сам момент удара.

Датчик давления жидкости подобран наиболее устойчивый к гидроударам. Важным

фактором при выборе являлось наличие у датчика прочного титанового слоя, защищающего тензочувствительную мембрану от резких перепадов давления [21].

Измерение объема жидкости предлагается производить индуктивным датчиком перемещения. Данный датчик позволит измерять мгновенные изменения высоты столба жидкости при ударе.

Датчики давления и температуры располагаются внутри герметичной камеры в непосредственной близости к подвижному цилиндру (поршню) (рис. 1). Данное расположение позволит фиксировать изменение температуры и давления с минимальной задержкой на распространение импульса удара в жидкости.

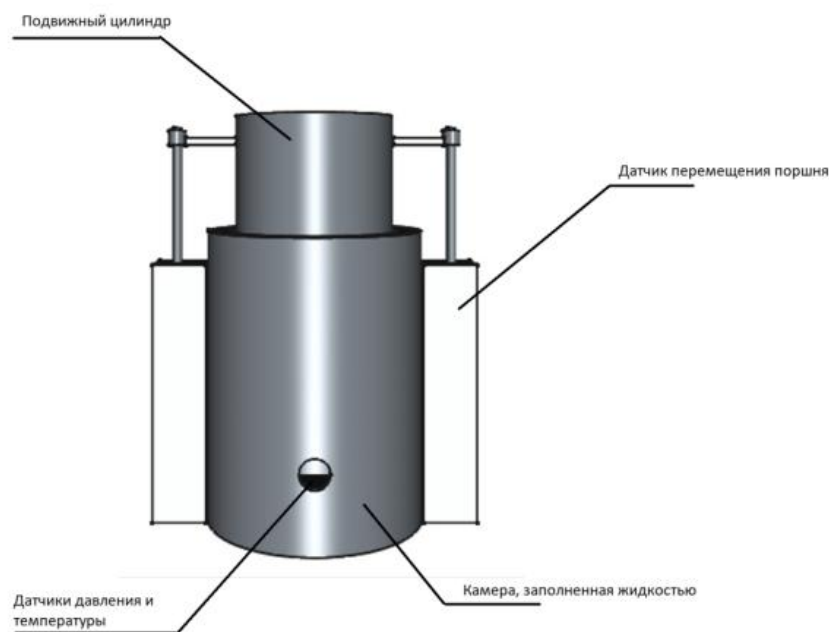


Рис. 1. 3D-модель измерительной системы

Fig. 1. 3D-model of measurement system

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все используемые датчики являются аналоговыми и передают сигнал на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [22-24]. Оцифрованный сигнал передается на микроконтроллер, который обрабатывает полученную информацию в соответствии с разработанной методологией [25-27].

Важным этапом обработки данных является точное определение временных меток отдельных ударов для расчета интеграла давления по времени [28-30]. Предполагается, что измерительная система будет располагаться в непосредственной близости к долоту. Исходя из этого, можно сделать вывод, что форма ударного импульса в момент осевого удара будет определенной формы и будет напрямую зависеть от типа долота и формы зубцов на нем. Например, для шарошечных долот с конусообразными зубцами [31-33] можно принять, что волновое уравнение распространения импульса удара будет совпадать с волновым уравнением боя аналогичной формы. Поскольку имеется функция, описывающая ожидаемую форму ударного импульса, для выделения отдельных ударов и определения временных пределов может быть использован метод взаимной корреляции [34, 35].

Таким образом, была предложена методология для определения импульса осевого удара долота в процессе бурения скважин, основанная на изменении состояния жидкости в герметичной камере.

#### Результаты (Results)

На основе разработанной методологии был разработан прототип измерительной системы (рис. 2).

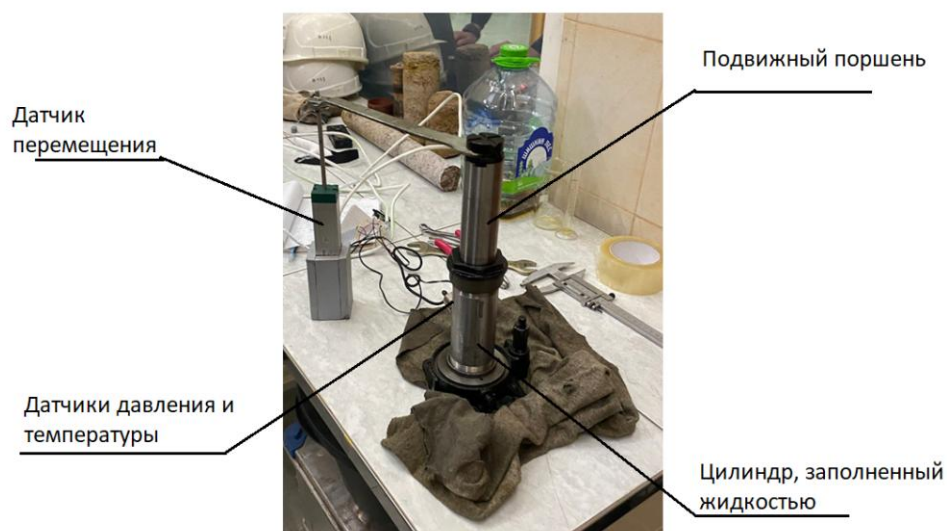


Рис. 2. Прототип измерительной системы

Fig. 2. Prototype of measurement system

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Прототип сконструирован для измерения импульса свободных ударов бойками различной формы. Свободные удары производились на лабораторном стенде, позволяющем фиксировать точную высоту, на которой расположен боек до начала свободного падения (рис. 3).



Рис. 3. Лабораторный стенд для исследования свободных ударов

Fig. 3. Laboratory stand for studying free impacts

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для экспериментов был выбран боек конусообразной формы массой 10 кг. Для определения формы ударного импульса для данного бойка используем графоаналитический метод, в соответствии с которым боек сложной геометрической формы ( $f_l(x)$ ) аппроксимируется ступенчатым цилиндрическим телом высотой  $l_l$  (рис. 4).

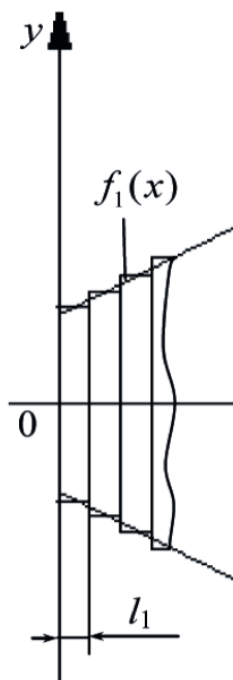


Рис. 4. Конусообразный боек

Fig. 4. Cone-shaped striker

\*Источник: Жуков И.А. Анализ форм бойков ударных систем графоаналитическим методом / И.А. Жуков, Л.Т. Дворников // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2009.  
Source: Zhukov I.A. Analysis of the shapes of strikers of impact systems using a graphoanalytical method / I.A. Zhukov, L.T. Dvornikov // Bulletin of computer and information technologies, 2009.

В данном методе длины ступеней задаются одинаковыми и минимально возможными, а диаметры определяются из условия равенства объемов разбитого на ступени и исходного бойка. С использованием компьютерных математических программ и была теоретически получена зависимость давления в камере от времени в момент удара конусообразным бойком с разных высот (рис. 5).

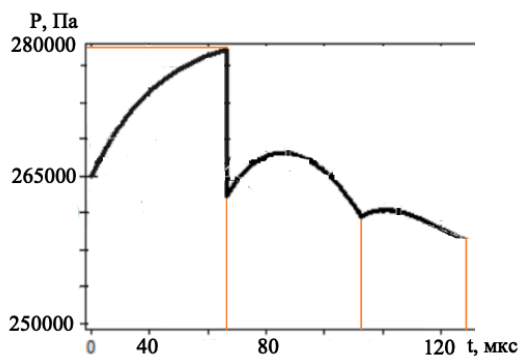


Рис. 5. Теоретически полученная зависимость давления в камере от времени в момент удара при падении с высоты 0.2 м

Fig. 5. The theoretically obtained dependence of the pressure in the chamber on time at the moment of impact when falling from a height of 0.2 m

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Свободные удары производились с различных высот в интервале от 100 мм до 250 мм с шагом 5 мм. На рисунке 6(а) представлены необработанные данные с датчика давления. На графике отражена зависимость давления от времени для последовательности из семи свободных ударов с высоты 0.2 м. Можно заметить, что данные с промышленного датчика давления при высокой частоте измерений имеют значительный уровень шумов. Для обработки данных был использован метод скользящей средней и фильтр с порогом в два стандартных отклонения. Результат обработки представлен на рисунке 6(б).

На рисунке 6(в) представлен график зависимости давления от времени для отдельного удара. Отметим, что форма и значения практически полученных данных близки к теоретически рассчитанным (рис. 5).



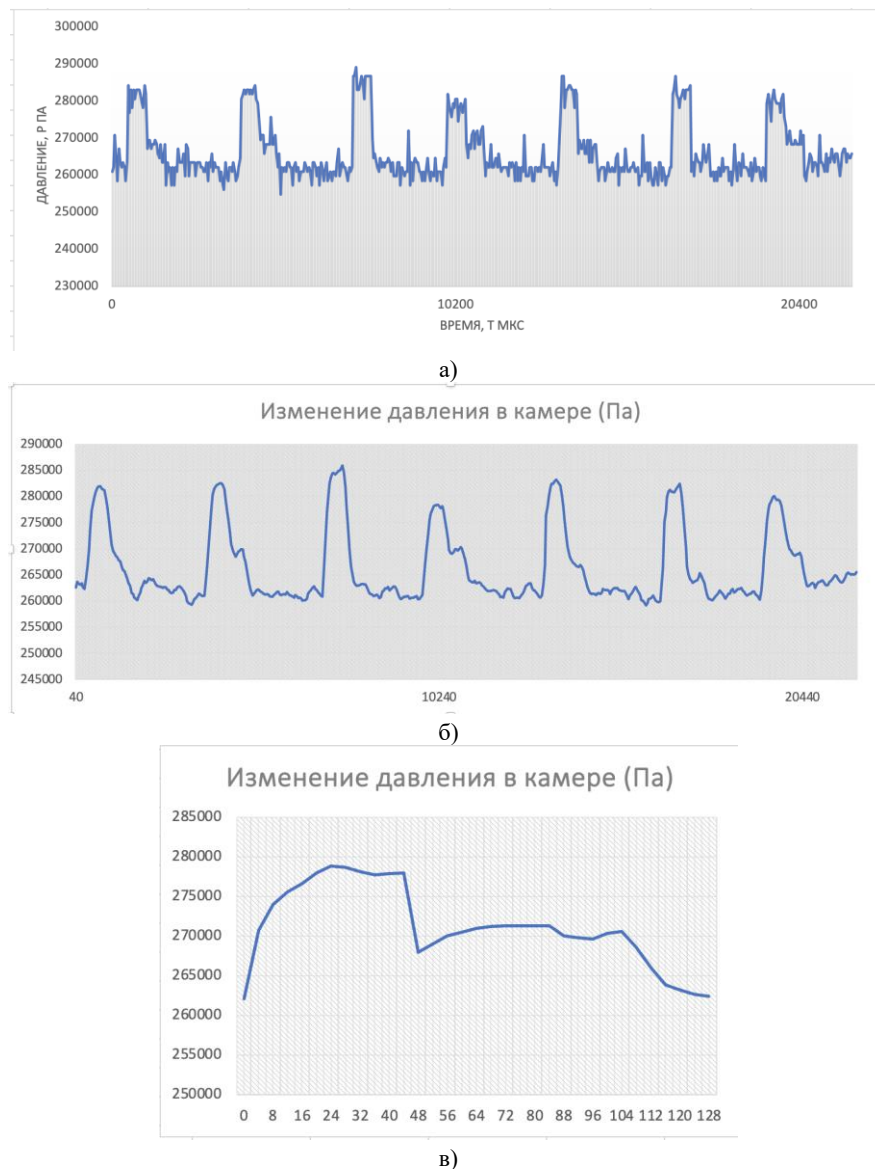


Рис. 6. Экспериментальные данные измерения давления внутри камеры: а) данные с датчика давления до обработки; б) данные после обработки; в) изменение давления для одного удара

Fig. 6. Experimental data for measuring the pressure inside the chamber: a) data from the pressure sensor before treatment; b) data after treatment; c) change in pressure for one impact

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Произведем расчет импульса отдельного удара конусообразного бойка массой 10 кг с высоты 0.2 м (рис. 6(в)).

$$J = 0,01 \int_0^t P(t)dt = 18,78 \quad (3)$$

Полученное значение близко к теоретически рассчитанному (19,79 кг\*м/с).

Также, в ходе анализа полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Температура жидкости внутри камеры оставалась постоянной из-за большого интервала времени между ударами и была равна 20.3°C.
2. Объем жидкости в момент удара оставался неизменным по причине слабой сжимаемости жидкости и был равен 210 см<sup>3</sup>.

#### Обсуждение (Discussions)

Полученная методология имеет недостатки, касающиеся допущений на распределение ударной волны по оси подвижного поршня, а также допущений на потери при теплообмене и совершаемой поршнем работе. Данные недостатки будут учтены при доработке расчетной теоретической формулы. Также, используемый метод определения временных меток внутренним таймером имеет недостаточную точность для поставленной задачи измерения импульса осевых колебаний, поскольку на практике осевые колебания

имеют высокую частоту. Для решения данной задачи планируется использование внешнего высокочастотного генератора, а также компенсации температурного дрейфа при записи информации о временных метках.

#### **Заключение или Выводы (Conclusions)**

Разработана методология измерения импульса продольных колебаний в процессе бурения скважин на основе динамики слабо сжимаемой жидкости. Успешно проведены лабораторные испытания прототипа измерительной системы, построенной по данной методологии. Планируется проведение испытаний с измерением импульса отдельного удара в режиме высокочастотной последовательности ударов для оценки потерь на теплообмен.

#### **Литература**

1. Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., Odintsov E.E. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. Russian Mining Industry. 2025;(1):162–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>
2. Jeong, Cheolkyun, Yu, Yingwei, Patino, Diego, Venkatakrishnan, Sai, and Darine Mansour. "Behavior Anomalies Detection in Drilling Time Series Through Feature Extraction." Paper presented at the IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, March 2022. doi: <https://doi.org/10.2118/208676-MS>
3. Isheyskiy, V., Martinyskin, E., Smirnov, S., Vasilyev, A., Knyazev, K., & Fatyanov, T. (2021). Specifics of MWD data collection and verification during formation of training datasets. Minerals, 11(8) doi:10.3390/min11080798
4. Gogolinskiy, K. V., & Syasko, V. A. (2020). Metrological assurance and standardization of advanced tools and technologies for nondestructive testing and condition monitoring (NDT4.0). Research in Nondestructive Evaluation, 31(5-6), 325-339. doi:10.1080/09349847.2020.1841863
5. Dvoynikov, M. V., Kutuzov, P. A. (2025). 'Analysis of Efficiency of Communication Channels for Monitoring and Operational Control of Oil and Gas Wells Drilling Process', International Journal of Engineering, 38(1), pp. 120-131. doi: 10.5829/ije.2025.38.01a.12
6. Gravley, Wilton. "Review of Downhole Measurement-While-Drilling Systems." J Pet Technol 35 (1983): 1439–1445. <https://doi.org/10.2118/10036-PA>
7. Chin, W.C. (2018). GE Oil & Gas MWD Developments (BakerHughes, a GE Company). In Measurement While Drilling (MWD) Signal Analysis, Optimization, and Design, W.C. Chin (Ed.).DOI 10.1002/9781119479307.ch15
8. Z. Wang, M. Poscente, D. Filip, M. Dimanchev and M. P. Mintchev, "Rotary in-drilling alignment using an autonomous MEMS-based inertial measurement unit for measurement- while-drilling processes," in IEEE Instrumentation , Measurement Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 26-34, December 2013, doi: 10.1109/MIM.2013.6704968.
9. Nayeem, A. A., Venkatesan, R. , Khan, F. Monitoring of down-hole parameters for early kick detection. J. Loss Prev. Process Ind. 40, 43–54 (2016) DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.025
10. Isheyskiy, V. A., Martynushkin, E. A., Vasiliev, A. S., & Smirnov, S. A. (2021). DATA COLLECTION FEATURES OF DURING THE BLAST WELLS DRILLING FOR THE FORMATION OF GEOSTRUCTURAL BLOCK MODELS. Sustainable Development of Mountain Territories, 13(4), 608-619. doi:10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619
11. Brett, J. F., Warren, T. M., and S. M. Behr. "Bit Whirl: A New Theory of PDC Bit Failure." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1989. doi: 10.2118/19571-MS
12. Shigin, A. , Boreyko, D. , Tskhadaya, N. , Serikov, D.. (2021). Comparative analysis of roller drill bit performance. SOCAR Proceedings. 1-7. 10.5510/OGP2021SI200536
13. Teplyakova, A. V., Azimov, A. M., Alieva, L., & Zhukov, I. A. (2022). Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. Mining Informational and Analytical Bulletin, (9), 120-132. doi:10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_120
14. John Watton, Fundamentals of Fluid Power Control, Cambridge University Press, 2009, DOI: 10.1017/CBO9781139175241
15. Martin, H. (2014) Analysis of the Navier-Stokes Equations. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2, 938-947. doi: 10.4236/jamp.2014.210106.
16. Wanan Sheng, A revisit of Navier–Stokes equation, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Volume 80, 2020, Pages 60-71, DOI: 10.1016/j.euromechflu.2019.12.005.
17. Towhiduzzaman, Md. (2018). Performance Analysis of Continuity Equation and Its Applications. European Journal of Engineering and Technology Research. 1. 40-43. 10.24018/ejeng.2016.1.5.201.



18. V. A. Tolpaev, V. V. Paliev, The Continuity Equation in Two-Dimensional Models of Fluid and Gas Filtration in Curved Reservoirs of Finite Thickness, *Izvestiya of Saratov University*. New Ser. Ser.: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2007, Vol. 7, Issue 2, pp. 49–53. DOI: 10.18500/1816-9791-2007-7-2-49-53
19. E.D. Macklen, NTC Thermistor Materials, *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, 1991, Pages 328-331, DOI: 10.1016/B978-0-08-034720-2.50091-5
20. Jung, Taekeon & Yang, Sung. (2015). Highly Stable Liquid Metal-Based Pressure Sensor Integrated with a Microfluidic Channel. *Sensors*. 15. 11823-11835. 10.3390/s150511823.
21. Андреев В.П. Определение формы препятствия сенсорной системой мобильного робота с помощью ИК-датчиков расстояния типа GP2Y0A (Sharp). *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):195-207. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207>
22. Ivo Mateljan. Basic Definitions of Integrating SPL Meters. - 2010. - DOI: 10.1016/j.prosig.2010.03.013.
23. Decoding time station signals (DCF77 etc.) with a microcontroller. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00095-8.
24. Thomas K. Wright, J. Gorin, B. Zarlingo. Bringing New Power and Precision to gated Spectrum Measurements. - *High Frequency Electronics*, Aug. 2007. - DOI: 10.1109/MC.2007.332.
25. C. Bayliss, L. Dunleavy. Performing and Analyzing Pulsed Current-Voltage Measurements. - *High Frequency Electronics*, May 2004. - DOI: 10.1109/MC.2004.332.
26. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Калинина М.В., Ахметова Р.В. Система автоматизированного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса трубопроводного транспорта. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):144-150. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-144-150>
27. Essentials of Microcontroller Use Learning about Peripherals. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00097-6.
28. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ). *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2025;27(2):211-221. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221>
29. A.P. parliamentary. Pulsed Measurements. - In *The RF and Microwave Handbook*, CRC Press, 2000. - DOI: 10.1201/9781420039678.ch15.
30. F. Ahmad, M. Ashfaq, A. Ahmad, A. Iqbal, M. A. Rehan. A novel approach to predict the drilling performance of roller cone bits using machine learning. - *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022. - DOI: 10.1016/j.petrol.2022.109797.
31. H. Zhai, L. Wang, R. Li, Y. Zhang. A new model for predicting the wear of roller cone bits in hard rock drilling. - *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020. - DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.07.002.
32. M. A. Dar, J. W. deducted, J. A. Hart. Investigation of roller cone bit damage mechanisms using computational fluid dynamics. - *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018. - DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.005.
33. A New Methodology of Spatial Cross-Correlation Analysis. - *Journal of the European Physical Society*, 2015. - DOI: 10.1371/journal.pone.0126158 .
34. Chunchun Gao, Benjamin F. Chao, Bing Tan, Xudong Wu, Significance testing for cross correlation: A critical examination of correlations between ENSO and GRACE-derived terrestrial water storage variabilities, *Global and Planetary Change*, Volume 241, 2024, 104549, ISSN 0921-8181, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104549>.

#### Авторы публикации

**Двойников Владимир Михайлович** – аспирант кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия. [vladimir24032000@gmail.com](mailto:vladimir24032000@gmail.com)

**Растворова Ирина Ивановна** – д-р техн. наук, доцент кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия. [rastvorova@mail.ru](mailto:rastvorova@mail.ru)

**Юртаев Сергей Леонидович** – зам. директора НЦ Арктика Санкт-Петербургского Горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия.

## References

1. Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., Odintsov E.E. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. Russian Mining Industry. 2025;(1):162–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>
2. Saldivar, Belem. (2014). An Overview on the Modeling of Oilwell Drilling Vibrations. IFAC Proceedings Volumes. 47. 5169-5174. 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00478.
3. Isheyskiy, V., Martinyskin, E., Smirnov, S., Vasilyev, A., Knyazev, K., & Fatyanov, T. (2021). Specifics of MWD data collection and verification during formation of training datasets. Minerals, 11(8) doi:10.3390/min11080798
4. Gogolinskiy, K. V., & Syasko, V. A. (2020). Metrological assurance and standardization of advanced tools and technologies for nondestructive testing and condition monitoring (NDT4.0). Research in Nondestructive Evaluation, 31(5-6), 325-339. doi:10.1080/09349847.2020.1841863
5. Dvoynikov, M. V., Kutuzov, P. A. (2025). 'Analysis of Efficiency of Communication Channels for Monitoring and Operational Control of Oil and Gas Wells Drilling Process', International Journal of Engineering, 38(1), pp. 120-131. doi: 10.5829/ije.2025.38.01a.12
6. Gravley, Wilton. "Review of Downhole Measurement-While-Drilling Systems." J Pet Technol 35 (1983): 1439–1445. <https://doi.org/10.2118/10036-PA>
7. Chin, W.C. (2018). GE Oil & Gas MWD Developments (BakerHughes, a GE Company). In Measurement While Drilling (MWD) Signal Analysis, Optimization, and Design, W.C. Chin (Ed.).DOI 10.1002/9781119479307.ch15
8. Z. Wang, M. Poscente, D. Filip, M. Dimanchev and M. P. Mintchev, "Rotary in-drilling alignment using an autonomous MEMS-based inertial measurement unit for measurement- while-drilling processes," in IEEE Instrumentation , Measurement Magazine, vol. 16, no. 6, pp. 26-34, December 2013, doi: 10.1109/MIM.2013.6704968.
9. Nayeem, A. A., Venkatesan, R. , Khan, F. Monitoring of down-hole parameters for early kick detection. J. Loss Prev. Process Ind. 40, 43–54 (2016) DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.025
10. Isheyskiy, V. A., Martynushkin, E. A., Vasiliev, A. S., & Smirnov, S. A. (2021). DATA COLLECTION FEATURES OF DURING THE BLAST WELLS DRILLING FOR THE FORMATION OF GEOSTRUCTURAL BLOCK MODELS. Sustainable Development of Mountain Territories, 13(4), 608-619. doi:10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619
11. Brett, J. F., Warren, T. M., and S. M. Behr. "Bit Whirl: A New Theory of PDC Bit Failure." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1989. doi: 10.2118/19571-MS
12. Shigin, A. , Boreyko, D. , Tskhadaya, N. , Serikov, D.. (2021). Comparative analysis of roller drill bit performance. SOCAR Proceedings. 1-7. 10.5510/OGP2021SI200536
13. Teplyakova, A. V., Azimov, A. M., Alieva, L., & Zhukov, I. A. (2022). Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. Mining Informational and Analytical Bulletin, (9), 120-132. doi:10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_120
14. John Watton, Fundamentals of Fluid Power Control, Cambridge University Press, 2009, DOI: 10.1017/CBO9781139175241
15. Martin, H. (2014) Analysis of the Navier-Stokes Equations. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2, 938-947. doi: 10.4236/jamp.2014.210106.
16. Wanan Sheng, A revisit of Navier–Stokes equation, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Volume 80, 2020, Pages 60-71, DOI: 10.1016/j.euromechflu.2019.12.005.
17. Towhiduzzaman, Md. (2018). Performance Analysis of Continuity Equation and Its Applications. European Journal of Engineering and Technology Research. 1. 40-43. 10.24018/ejeng.2016.1.5.201.
18. V. A. Tolpaev, V. V. Paliev, The Continuity Equation in Two-Dimensional Models of Fluid and Gas Filtration in Curved Reservoirs of Finite Thickness, Izvestiya of SaratovUniversityv. New Ser. Ser.: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2007, Vol. 7, Issue 2, pp. 49–53. DOI: 10.18500/1816-9791-2007-7-2-49-53
19. E.D. Macklen, NTC Thermistor Materials, Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, 1991, Pages 328-331, DOI: 10.1016/B978-0-08-034720-2.50091-5
20. Jung, Taekeon & Yang, Sung. (2015). Highly Stable Liquid Metal-Based Pressure Sensor Integrated with a Microfluidic Channel. Sensors. 15. 11823-11835. 10.3390/s150511823.
21. Andreev V.P. Obstacle shape determination by mobile robot sensor system using GP2Y0A (Sharp) type IR distance sensors. Power engineering: research, equipment, technology. 2024;26(1):195-207. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207>
22. Ivo Mateljan. Basic Definitions of Integrating SPL Meters. - 2010. - DOI: 10.1016/j.prosig.2010.03.013.

23. Decoding time station signals (DCF77 etc.) with a microcontroller. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00095-8.
24. Thomas K. Wright, J. Gorin, B. Zarlingo. Bringing New Power and Precision to gated Spectrum Measurements. - High Frequency Electronics, Aug. 2007. - DOI: 10.1109/MC.2007.332.
25. C. Bayliss, L. Dunleavy. Performing and Analyzing Pulsed Current-Voltage Measurements. - High Frequency Electronics, May 2004. - DOI: 10.1109/MC.2004.332.
26. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Kalina M.V., Akhmetova R.V. System of automated monitoring and forecasting of the remaining resource of pipeline transport. Power engineering: research, equipment, technology. 2024;26(1):144-150. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-144-150>
27. Essentials of Microcontroller Use Learning about Peripherals. - 2024. - DOI: 10.1007/s43451-024-00097-6.
28. Orlov A.A., Krylova E.V., Shcherbakov V.M., Avdeev A.D. Intelligent system for monitoring and diagnostics of gas turbine installation elements (ISMDEGTU). Power engineering: research, equipment, technology. 2025;27(2):211-221. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221>
29. A.P. parliamentary. Pulsed Measurements. - In The RF and Microwave Handbook, CRC Press, 2000. - DOI: 10.1201/9781420039678.ch15.
30. F. Ahmad, M. Ashfaq, A. Ahmad, A. Iqbal, M. A. Rehan. A novel approach to predict the drilling performance of roller cone bits using machine learning. - Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022. - DOI: 10.1016/j.petrol.2022.109797.
31. H. Zhai, L. Wang, R. Li, Y. Zhang. A new model for predicting the wear of roller cone bits in hard rock drilling. - Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020. - DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.07.002.
32. M. A. Dar, J. W. deducted, J. A. Hart. Investigation of roller cone bit damage mechanisms using computational fluid dynamics. - Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018. - DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.005.
33. A New Methodology of Spatial Cross-Correlation Analysis. - Journal of the European Physical Society, 2015. - DOI: 10.1371/journal.pone.0126158 .
34. Cross-correlation PIV : theory, implementation and accuracy. - Technische Universiteit Eindhoven, 2000. - DOI: 10.6100/IR531139

#### **Authors of the publication**

**Vladimir M. Dvoynikov** – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.  
[vladimir24032000@gmail.com](mailto:vladimir24032000@gmail.com)

**Irina I. Rastvorova** – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.  
[rastvorova@mail.ru](mailto:rastvorova@mail.ru)

**Sergey L. Yurtaev** – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** **07.10.2025 г.**

**Отредактировано** **05.11.2025 г.**

**Принято** **24.11.2025 г.**