

УДК 622.243

**ПРОГРАММА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ  
КОМПОНОВКИ НИЗА БУРОВОЙ КОЛОНКИ С УЧЕТОМ  
НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ****Иванов Р.О., Лушпей В.П., Панков М.Е.***ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, e-mail: rectorat@dyfu.ru*

В настоящее время существенно увеличилась потребность в горизонтально-направленном бурении, однако при больших отходах от вертикали наблюдается неравномерное вращение компоновки низа буровой колонки (КНБК), что приводит к неуправляемости КНБК и прекращению бурения. В исследованиях, направленных на управление процессом бурения, затрагиваются различные методы моделирования управлением движением компоновки низа буровой колонки (КНБК) по заданной траектории. В то же время используемые в настоящее время методы управления не позволяют в полной мере использовать возможности перспективных КНБК. Целью настоящей работы является разработка программы, реализующей указанные требования и оценка ее практической применимости. Предложена компьютерная программа управления процессом бурения с открытой архитектурой, иллюстрирующая работоспособную версию основного интерфейса программы с некоторыми важными расчетными функциями и пригодная для модификации в случае усложнения решаемых задач, связанных с особенностями бурения скважины. В настоящее время программа позволяет оценивать планируемую нагрузку на крюке, соответствующую заданному усилию подачи на забой с учетом трения буровой колонны по стенкам скважины. Кроме того, заложенные в программе структуры позволяют решать и более сложные задачи, возникающие при движении КНБК в реальной породе. Полученные в ходе работы программы результаты позволяют сделать вывод об адекватности математической и имитационной моделей движения КНБК реальным ситуациям бурения.

**Ключевые слова:** направленное бурение, компоновка низа буровой колонки, управление бурением, математическая модель, программа

**PROGRAM FOR THE BOTTOM OF THE DRILL BIT CONTROLLED  
MOVEMENT ANAGEMENT SIMULATION THAT TAKING  
IN ACCOUNT NON-CONTROLLED FACTORS****Ivanov R.O., Lushpey V.P., Pankov M.E.***Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: rectorat@dyfu.ru*

At present time, the need for horizontal directional drilling substantially increased, but for large waste from the vertical, uneven rotation of the bottom hole assembly (BHA) is observed, which leads to uncontrolled BHA and drilling stop. In studies aimed on managing the drilling process, various methods of the movement control of the BHA along a given trajectory modeling are used. At the same time, these currently used methods do not allow to take full advantage of the opportunities of BHA. So, the purpose of this work is to develop a program that implements these requirements and assess its practical applicability. The computer program for managing the drilling process with an open architecture has been developed to illustrate the operational version of the main program interface with some important design functions and is suitable for modification in the case of more complicated tasks related to the features of drilling a well. Currently, the program allows you to evaluate the planned load on the hook, corresponding to a given feed force to the face, taking into account the friction of the drill string along the walls of the well. In addition, the structures incorporated in the program allow solving even more complex problems arising during the movement of the drill bit in real rock. The results obtained during the work of the program allow us to conclude that the mathematical and simulation models of the bottom of the drill bit movement are adequate for real drilling situations.

**Keywords:** directional drilling, bottom of the drill bit, drilling control, mathematical model, program

В настоящее время существенно увеличилась потребность в горизонтально-направленном бурении – в строительстве сложных трехмерных (3D) горизонтальных скважин с большими отходами от вертикали [1]. Однако сложные профили горизонтальных скважин являются причиной недохождения нагрузки до долота при бурении; при больших отходах от вертикали наблюдается неравномерное вращение компоновки низа буровой колонки (КНБК), что приводит к неуправляемости КНБК и прекращению бурения. В связи с этим повышение сложности условий добычи нефти

и газа, труднодоступность разрабатываемых месторождений, увеличение глубины залегания продуктивных пластов приводят к необходимости комплексной автоматизации процессов бурения нефтегазовых скважин, разработки и внедрения новых образцов забойной аппаратуры, телеизмерительных и управляющих систем, основанных на применении современных достижений в данных областях [2].

В исследованиях, направленных на управление процессом бурения, затрагиваются различные процессы моделирования, в особенности управление движением

КНБК по заданной траектории [3, 4]. Вместе с тем предлагаемые методы управления бурением не позволяют в полной мере использовать возможности перспективных КНБК. В то же время проведенный нами ранее анализ возможностей моделирования, способного отражать направление движения бурового инструмента одновременно по зенитному углу и азимуту [5], показал возможность разработки программы, реализующей данные требования.

Цель исследования: разработка программы, реализующей возможность моделирования направления движения бурового инструмента одновременно по зенитному углу и азимуту и оценка ее практической применимости.

#### Материалы и методы исследования

Для того чтобы КНБК, как объект управления, выполнял свои функции, необходимо решить две задачи. Первая задача заключается в определении его номинальной траектории движения. С математической точки зрения данная задача состоит в описании программы управления (задача программирования управления).

Вторая задача заключается в формировании закона управления КНБК. Под законом управления в данном случае понимается зависимость управляющих воздействий от тех параметров, которые доступны измерению в процессе движения в любой (текущий) момент. Решение этой задачи позволяет сформировать (синтезировать) структуру системы управления КНБК, работающей по принципу обратной связи (задача синтеза управления).

При решении как задачи программирования, так и задачи синтеза управления необходимо иметь в виду, что на буровую колонну в целом и КНБК в процессе продвижения в скважине действуют различные возмущения, без учета которых нельзя обойтись. Характерным примером является задача управления конечным состоянием КНБК, когда требуется осуществить её выведение в требуемый район назначения с заданной точностью. При этом возможны случаи, когда решение той или иной задачи без учета возмущений вообще не может обеспечить требуемой точности управления. Поэтому при формировании, как программы, так и закона управления КНБК, как правило, следует учитывать действие неконтролируемых факторов. При этом следует рассматривать две группы факторов. Первая группа представляет со-

бой факторы, свойственные всем задачам управления движением объектов (летательные аппараты, роботы, манипуляторы и т.п.). Вторая группа описывает факторы, свойственные именно конкретному управляемому объекту, такие как ошибки задания условий внешней среды, ошибки при расчёте управляющих воздействий и погрешности решения задачи навигации. Кратко рассмотрим эти факторы.

*Ошибки задания условий внешней среды.* При расчёте программного движения используются данные о внешней среде, в которой движется объект управления. В данном случае – это свойства соответствующих горных пород. В действительности параметры среды отличаются от параметров, задаваемых при расчёте программной траектории. Это приводит к отклонению реального положения КНБК от расчетного положения.

*Ошибки при расчёте управляющих воздействий.* Для реализации программного движения рассчитываются управляющие воздействия, позволяющих направлять КНБК по программной траектории путём использования силовых и управляющих устройств (нагрузка на крюке, поворот буровой колонны вокруг ее оси и радиус кривизны отклоняющего устройства). При этом при расчёте управляющих воздействий используются некоторые математические модели, неизбежно содержащие методологические ошибки, погрешности реализации, округления и т.п. Компенсация этих факторов требует разработки более точных, часто громоздких и трудно реализуемых практически моделей.

Кроме того, при расчёте программного движения используются также данные о самом объекте управления, в данном случае буровой колонне и КНБК, представляющие собой массово-геометрические, силовые и др. характеристики. Эти данные также содержат погрешности, связанные с их заданием и реализацией.

*Погрешности решения задачи навигации.* Частичная компенсация отклонений КНБК от программной траектории принципиально возможна путём сокращения рассмотренных выше ошибок и погрешностей. Однако на практике данная компенсация сильно осложнена как технологическими, так и экономическими обстоятельствами. Обычно соответствующие мероприятия трудно реализуемы либо очень дороги.

На практике компенсация данных отклонений осуществляется на основе решения задачи навигации, состоящей в опреде-

лении текущих параметров движения КНБК (времени, координат, скоростей, их комбинаций). Параметры определяются на основе показаний соответствующих приборов (инклинометров, акселерометров, гироскопов, магнитных компасов, акустических датчиков положения и др.) пластов [2]. В показаниях данных приборов также содержатся инструментальные ошибки. При рассмотрении движения КНБК выявляется и присутствующий одновременно с вышеупомянутыми проявлениями фактор, связанный с упругим закручиванием буровой колонны вокруг ее оси. Следовательно, при разработке имитационной модели, описывающей процесс бурения, важно также учитывать и то, что буровая колонна, имеющая большую длину и нагруженная осевым сжатием, может потерять устойчивость и начать упираться в стенки ствола шахты.

На рис. 1 приведена блок-схема программной реализации имитационной модели управления траекторией движения компоновки низа буровой колонны с учетом существующих неконтролируемых факторов, а на рис. 2 приведены скриншоты ее интерфейса.

Разработанная нами в соответствии с этой блок-схемой программа имитационной модели управления траекторией движения компоновки низа буровой колонны с учетом существующих неконтролируемых факторов «Наклонное бурение» устанавливается в директорию «Bur\_1», содержащую изначально исполняемый файл «Bur\_1.exe», файл «Инструкция по программе.txt» и поддиректорию «Образцы файлов», в которой находятся типовые файлы, облегчающие обучение и начало работы с программой.

При программировании использовались только функции самой операционной системы Windows – Win32 API. Отладка и компиляция исполняемого файла проводились Microsoft Visual Studio 2013 C++ Redistributable x64/86, причем встроенные в транслятор библиотеки классов не использовались. Таким образом, дальнейшее развитие программы может проводиться с использованием любого транслятора C++ для Win32, независимо от его версии и фирмы-производителя.

При первом запуске программы появится сообщение (рис. 2, А), а после положительного ответа появится сообщение об успешном создании рабочей директории (рис. 2, Б), затем откроется файл инструкции по работе с программой (рис. 2, В).

В случае же отрицательного ответа программа завершает работу.

При запуске программы для расчетов в поддиректории «Расчет скважины» должны находиться вспомогательные текстовые файлы с исходными данными по расчету планируемой скважины и параметрам месторождения. В том случае, если программа успешно открывает эти файлы и считывает из них информацию, заполняются соответствующие структуры программы и начинается ее содержательная расчетная часть. Если же часть необходимых файлов отсутствует, то появляются соответствующие предупреждения (рис. 2, Г) и программа завершает работу.

В случае наличия всех необходимых для работы файлов программа в рабочем режиме расчетов вначале считывает файл «Плановая скважина.txt», затем файлы «Структура месторождения.txt», «План проходки.txt», «Пробуренный участок.txt» и «Случайные факторы.txt» и заносит данные в поля соответствующих классов. Далее программа в простейшем случае автоматически проводит расчеты, записывает результаты в выходной файл «Отчет о расчете.txt» и выдает извещение об окончании работы (рис. 2, Д).

Таким образом, разработанная компьютерная программа с открытой архитектурой иллюстрирует работоспособную версию основного интерфейса с некоторыми важными расчетными функциями, пригодную для модификации в случае необходимости решения сколь угодно сложных задач, связанных с особенностями бурения скважины.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время программа позволяет оценивать планируемую нагрузку на крюке, соответствующую заданному усилию подачи на забой с учетом трения бурильной колонны по стенкам скважины. Кроме того, заложенные в программе структуры позволяют решать и более сложные задачи, возникающие при движении КНБК в реальной породе. В реализованном варианте программа рассчитывает планируемый вес на крюке в зависимости от длины спущенной в скважину бурильной колонны.

Для упрощения расчетов плотность материала трубы принята равной  $7,8 \times 10^3$  [кг/м<sup>3</sup>]. Плотность бурового раствора принята равной  $1,1 \times 10^3$  [кг/м<sup>3</sup>], т.е.  $\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)$  примем равным 0,86, что видимо, является достаточно

точной оценкой. Следовательно, для трубы диаметром 127 мм со стенкой 10 мм погонная масса составит 57,3 [кг/м], а для утяжеленной буровой трубы с внутренним диаметром 45 мм погонная масса составит 173 [кг/м] (участок длиной 36 м ве-

сит 6,2 т). Будем считать, что  $\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \mu g$  равно 483 [Н/м].

Тогда выведенное нами ранее в работах [5–7] уравнение

$$\frac{dT}{ds} = -k(s)T \frac{d\theta}{ds} - \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \mu g (-k(s)\sin(\theta) + \cos(\theta))$$

можно анализировать, проинтегрировав его от устья скважины до заданной длины буровой колонны дважды – положив у устья скважины  $T = T_0$  равным нулю и  $T = T_1$  равным, например, 1 кН. Тогда для любой величины  $T_x = T_x(s)$  в [кН] в конце скважины, пробуренной на заданную длину  $s$ , мы находим значения  $T_0(s)$  и  $T_1(s)$ . В этом случае около устья скважины следует положить  $T(T_x) = T_1(T_x(s) - T_0(s)) / T_1(s) - T_0(s)$ , где сила выражена в [кН]. А участок утяжеленных буровых труб длиной 36 м, имеющий избыточный вес по сравнению с обычными трубами 4,1 т, а также вес КНБК (около 10 т) при расчетах учитывается как сосредоточенная масса, скользящая в соответствии с зенитным углом скважины под действием силы тяжести и коэффициента трения. В результате мы можем выразить как зависимость усилия подачи на забой от веса

на крюке, так и наоборот – зависимость веса на крюке от требуемого усилия подачи на забой.

Анализируя отклонение параметров уже пробуренного участка скважины от запланированного профиля, программа рассчитывает необходимые управляющие воздействия для возвращения дальнейшего профиля скважины к проектному профилю. Программа имеет открытую архитектуру и легко может быть дополнена необходимыми для специальных расчетов модулями.

Работа программы была протестирована с использованием данных реального месторождения, предоставленных Ассоциацией буровых подрядчиков [8] (данные не приводятся). При этом было проведено сравнение результатов тестирования



Рис. 1. Блок-схема компьютерной программы имитации управляемого бурения

с результатами расчетов, полученными по методике ВНИИБТ [9]. Как видно из рис. 3, результаты расчета с использованием данного уравнения намного более точно соответствуют реальным данным веса на крюке (непрерывная линия), чем результаты расчетов, проведенные по методике ВНИИБТ.

Затем, используя данные о структуре месторождения, программа рассчитывает планируемое время работы в зависимости от длины спущенной в скважину колонны буровых труб. На рис. 4 приведены результаты таких расчетов планируемого времени работы буровой установки для реального месторождения.

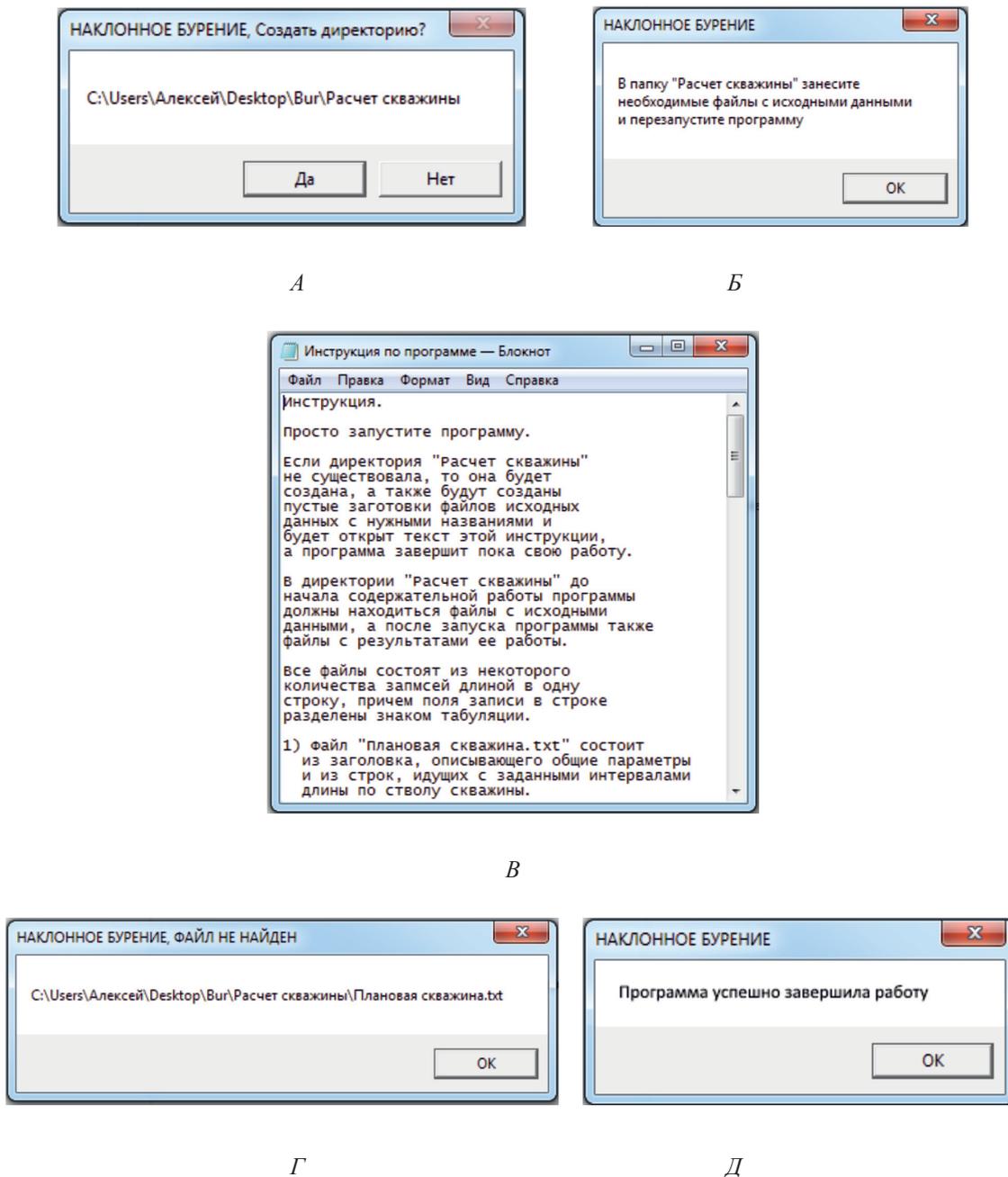


Рис. 2. Скриншоты работы программы. А – запрос о создании рабочей директории; Б – информация об успешном создании рабочей директории; В – инструкция по работе с программой; Г – информация об отсутствии необходимого файла данных; Д – информация об успешном завершении работы программы

Вес на крюке при подаче на забой 10 тс,  
коэффициент трения 0,2

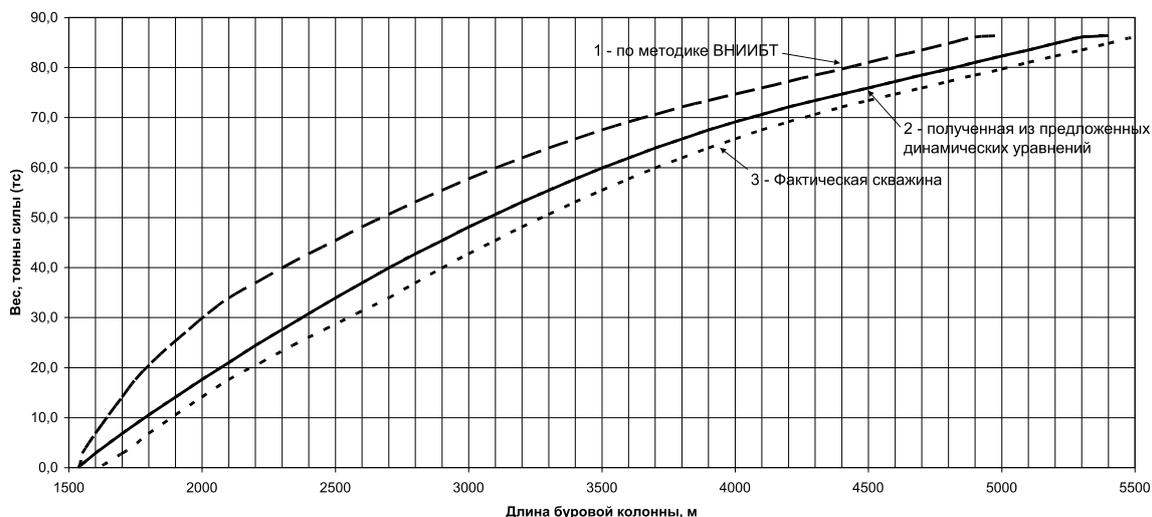


Рис. 3. Планируемый вес на крюке в зависимости от длины спущенной в скважину колонны буровых труб при подаче на забой 10 тс и коэффициенте трения 0,2: верхняя пунктирная – результаты расчетов по методике ВНИИБТ, непрерывная линия – данные для реальной скважины, нижняя пунктирная – результаты расчета программы «Бурение»

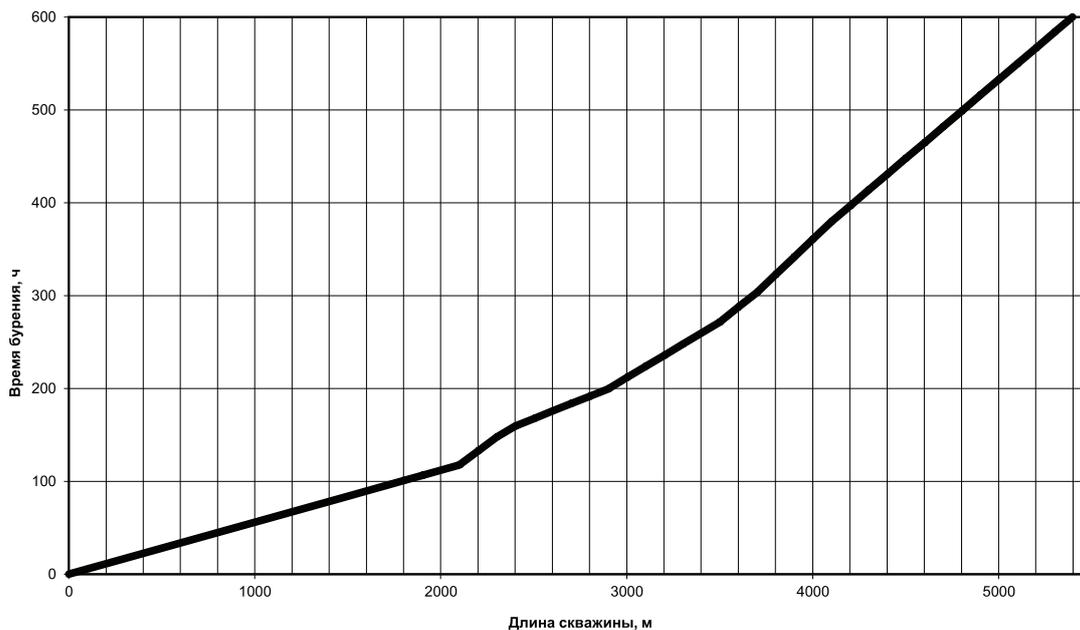


Рис. 4. Планируемое время работы буровой установки в зависимости от длины введенной в скважину буровой колонны. (Типичное поведение с учетом свойств слоев)

### Заключение

Таким образом, разработанная компьютерная программа с открытой архитектурой иллюстрирует работоспособную версию основного интерфейса с некоторыми важными расчетными функциями, пригодную для модификации в случае усложнения ре-

шаемых задач, связанных с особенностями бурения скважины. В настоящее время программа позволяет оценивать планируемую нагрузку на крюке, соответствующую заданному усилию подачи на забой с учетом трения буровой колонны по стенкам скважины. Кроме того, заложенные в про-

грамме структуры позволяют решать и более сложные задачи, возникающие при движении КНБК в реальной породе.

Полученные при работе программы результаты позволяют сделать вывод об адекватности математической и имитационной моделей движения КНБК реальным ситуациям бурения.

#### Список литературы

1. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2016. Vol. 2, № 4. P. 365–395.
2. Автоматизированная система управления траекториями нефтегазовых скважин с применением прогнозирующих моделей / И.Ф. Нугаев [и др.] // *Вестник УГАТУ*. – 2006. – № 5. – С. 27–32.
3. Dong G., Chen P. A Review of the Evaluation, Control, and Application Technologies for Drill String Vibrations and Shocks in Oil and Gas Well // *Shock and Vibration*. 2016. Vol. 2016. Article ID 7418635, 34 p.
4. Callejo A., Arbatani S., Kövecses J., et al. Drill Bit Contact Dynamics Including Side Cutting: Simulation and Validation // *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2017. Vol. 139, № 2. P. 022910–022910-7.
5. Иванов Р.О. Разработка математической модели управляемого движения бурового инструмента / Р.О. Иванов, В.П. Лушпей // *Естественные и технические науки*. – 2017. – № 11 (113). – С. 105–111.
6. Иванов Р.О. Совершенствование методов дистанционно направленного бурения с учетом геомеханических особенностей грунтов / Р.О. Иванов, В.П. Лушпей // *Естественные и технические науки*. – 2016. – № 10 (100). – С. 57–64.
7. Иванов Р.О. Учет крепости горных пород при бурении скважин // *Наука в современном обществе: закономерности и тенденции развития: сборник статей Международной научно-практической конференции (25 февраля 2017 г., г. Пермь)*. В 2 ч.: Часть 2. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 21–27.
8. Ассоциация буровых подрядчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.adcr.ru/index.php?page=about&menu=council> (дата обращения: 17.06.2018).
9. Инструкция по бурению наклонно направленных скважин. – М.: ВНИИБТ, 1966. – 115 с.

#### References

1. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2016. Vol. 2, № 4. P. 365–395.
2. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya traektoriyami neftegazovy'x skvazhin s primeneniem prognoziryushhix modelej / I.F. Nugaev [i dr.] // *Vestnik UGATU*. – 2006. – № 5. – pp. 27–32.
3. Dong G., Chen P. A Review of the Evaluation, Control, and Application Technologies for Drill String Vibrations and Shocks in Oil and Gas Well // *Shock and Vibration*. 2016. Vol. 2016. Article ID 7418635, 34 p.
4. Callejo A., Arbatani S., Kövecses J., et al. Drill Bit Contact Dynamics Including Side Cutting: Simulation and Validation // *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2017. Vol. 139, № 2. pp. 022910–022910-7.
5. Ivanov R.O. Razrabotka matematicheskoy modeli upravlyаемого dvizheniya burovogo instrumenta / R.O. Ivanov, V.P. Lushpej // *Estestvenny'e i texnicheskie nauki*. – 2017. – № 11 (113). – pp. 105–111.
6. Ivanov R.O. Sovershenstvovanie metodov distancionno napravlenного бурения s uchetoм geomexanicheskix osobennoстей gruntov / R.O. Ivanov, V.P. Lushpej // *Estestvenny'e i texnicheskie nauki*. – 2016. – № 10 (100). – pp. 57–64.
7. Ivanov R.O. Uchet kreposti gornyx porod pri бурении skvazhin // *Nauka v sovremennom obshhestve: zakonovernosti i tendencii razvitiya: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (25 fevralya 2017 g., g. Perm')*. V 2 ch.: Chast' 2. – Ufa: AE`TERNA, 2017. – pp. 21–27.
8. Associaciya burovyx podryadchikov [E`lektronny'j resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.adcr.ru/index.php?page=about&menu=council> (data obrashheniya: 17.06.2018).
9. Instrukciya po бурению naklonno napravlenny'x skvazhin. – M.: VNIIBT, 1966. – 115 p.