

УДК 622.32: 532

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОФИЦИРОВАННОГО СВЕРЛЯЩЕГО ПЕРФОРАТОРА

А. В. Месропян¹, М. О. Митягина²

¹ mesropyan@ugatu.ac.ru, ² volk-mmo@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 18 января 2015 г.

Аннотация. Предложена математическая модель электрогидравлического сверлящего перфоратора, учитывающая влияние физико-механических свойств горных пород на скорость перфорации канала в продуктивном пласте. Рассчитан и построен переходный процесс перемещения штока гидроцилиндра подачи бура на гибком валу.

Ключевые слова: электрогидравлический сверлящий перфоратор; углеводороды; математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Вторичное вскрытие продуктивного пласта является одной из наиболее важных операций, влияющих на дальнейшую эффективную эксплуатацию нефтегазовых скважин.

В настоящее время значительная часть работ по вторичному вскрытию пластов осуществляется с помощью прострелочно-взрывных технологий: корпусных и бескорпусных кумулятивных перфораторов. Использование кумулятивных перфораторов в большинстве случаев приводит к разрушению цементного кольца в заколонном пространстве, вследствие чего ухудшается сцепление цементного камня с колонной труб, возникают заколонные перетоки, кольматация призабойной зоны пласта (особенно в терригенных песчаниках), что в конечном итоге приводит к падению коэффициента извлечения нефти (КИН).

С точки зрения получения максимально возможного КИН, наиболее перспективным представляется применение сверлящей перфорации. В отличие от кумулятивной перфорации, она не оказывает воздействия на целостность крепления скважины и фильтрационные свойства пород продуктивного пласта. Также следует отметить эффективность сверлящей перфорации при выработке трудноизвлекаемых запасов углеводородов, в том числе и маломощных продуктивных пластов, пластов с подошвенной водой, когда требуется обеспечить высокую точность перфорации.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРЛЯЩИХ ПЕРФОРАТОРОВ ДЛЯ ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ

Первыми из отечественных сверлящих перфораторов достаточно широкое распространение получили перфораторы типа ПС-112 и ПС-112/70 производства ОАО НПП «ВНИИГИС» [1]. Выход сверла у данных перфораторов составляет всего 70 мм (время перфорации канала около 5 мин), что является недостаточным для преодоления зоны кольматации. Позже были разработаны модификации перфоратора ПС-112 – сверлящие перфораторы ПГСП и ПГСП-2 с выходом сверла 120 и 150 мм соответственно. Анализ конструктивно-компоновочных схем сверлящих перфораторов типов ПС и ПГСП позволил выявить общие недостатки существующей аппаратуры – зависимость крутящего момента от нагрузки на буровую головку и, как следствие, невысокий ресурс бура, сравнительно низкая производительность и высокая аварийность работ, а также отсутствие энергонезависимой системы расфиксации перфоратора в скважине, вследствие чего нет возможности извлечь перфоратор из скважины при возникновении аварийной ситуации.

Для повышения эффективности вторичного вскрытия пласта в ООО «ПИТЦ «Геофизика» совместно с НПФ «ЭРГИС» создан сверлящий перфоратор глубокого проникновения на кабеле ПС-112/18/500 с выходом сверла 500 мм [2, 3].

Данной аппаратуре присущи те же недостатки, что и перфораторам ПС и ПГСП.

В начале XXI века НПП «Интехком» предложила технологию вскрытия продуктивного пласта с применением перфобура, создающего перфорационные каналы глубиной до 14 м. Перфобуры создают перфорационные каналы глубиной до 40 м. Основными недостатками данных устройств является то, что при просверливании каналов перфобуры не выдерживают выбранное направление, поскольку гибкий вал способен изогнуться в любую сторону, продвигаясь вслед за режущим инструментом по пути наименьшего сопротивления, а также отсутствие действенного контроля за проводкой боковых ответвлений, особенно при незначительной мощности продуктивного пласта или близком нахождении газонефтяного контакта (ГНК).

ОАО «ОСКБП» разработан электробур для резки бокового ствола (ЭЗБС) в нефтяном и газовом пластах. ЭЗБС предназначен для создания канала между скважиной и продуктивным пластом путем сверления отверстия диаметром 20 мм и длиной до 0,85 м в обсадной колонне и призабойном пространстве. ЭЗБС может использоваться на скважинах с внутренним диаметром обсадной колонны 130 и 150 мм и толщиной стенок до 12 мм, что значительно ограничивает его применение при вторичном вскрытии продуктивных пластов [4, 5]. Данная аппаратура не нашла широкого применения вследствие большей продолжительности перфорирования каналов – время сверления канала глубиной 0,85 м занимает около 45 мин.

Исходя из технических условий вторичного вскрытия пластов, анализа научно-технической литературы, анализа конструктивно-компоновочных схем технических средств для вторичного вскрытия продуктивных пластов, были определены основные технические характеристики перспективных сверлящих перфораторов (табл. 1).

Таким образом, в настоящее время актуальна задача проектирования и совершенствования сверлящих перфораторов для вторичного вскрытия продуктивных пластов, обеспечивающих создание качественной гидродинамической связи продуктивного пласта со скважиной, способных выполнять перфорационные каналы требуемой протяженности в сложнопостроенных коллекторах, представленных тонким переслаиванием литологических разностей пород с различной пористостью и фильтрационно-емкостными свойствами, определяемыми в том числе и системой трещин и каверн.

Таблица 1

Основные технические характеристики перспективного сверлящего перфоратора

Технические параметры	Значения технических параметров
Глубина перфорационного канала, м	не менее 0,2
Время перфорации одного канала, мин	не более 3
Максимальное число сверлений за спуск	до 40*
Плотность перфорации, отв./м	6–20**
Время фиксации перфоратора, мин	не более 0,2
Энергонезависимая система расфиксации перфоратора в скважине	присутствует

* определяется ресурсом бурового инструмента и геолого-техническими условиями скважины;

** определяется геологическими особенностями и фильтрационно-емкостными свойствами пласта-коллектора.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СВЕРЛЯЩЕГО ПЕРФОРАТОРА С УЧЕТОМ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРФОРИРУЕМЫХ ПОРОД

Особенности эксплуатации электрогидравлических сверлящих перфораторов в скважинных условиях характеризуются рабочими процессами, связанными с перфорацией продуктивных пластов, отличающихся по своей геологии, физическим свойствам, литологической принадлежности, характеру насыщения, структуры порового пространства, степени глинистости. При таких условиях работы различные геологические особенности перфолируемых пород могут оказывать существенное влияние на переходные процессы исполнительных механизмов гидропривода, в связи с чем возникает необходимость учета твердости пород при моделировании гидросистемы сверлящего перфоратора [6–9].

На сегодняшний день для измерения твердости горных пород используется несколько методов, среди которых можно выделить методы определения твердости минералов по шкале Мооса, по шкале Кнупа и метод, разработанный Л. А. Шрейнером.

По шкале Мооса в качестве эталонов твердости выбрано десять минералов, отличающихся тем, что каждый последующий минерал царапает предыдущий, более мягкий. Шкала Кнупа обеспечивает лучшее сопоставление твердо-

сти: по этой шкале твердость алмаза лежит в пределах 8000–8500 ед. Кнупа, что в четыре раза выше корунда (1700–2000 ед.) и в три раза выше твердого сплава (табл. 2). Твердость породы по методу Л. А. Шрейнера определяется по нагрузке на пуансон в момент ее разрушения. Количественно твердость по штампу определяется отношением разрушающей силы к площади штампа. Во время нагружения штампа (пуансона) самопишущий прибор регистрирует нагрузку и вычерчивает диаграмму деформации, по которой определяют твердость $p_{ш}$, условный предел текучести δ_r , коэффициент пластичности $K_{пл}$ и удельную контактную работу разрушения A_s (табл. 3) [10, 11].

Таблица 2

Сравнительная твердость различных минералов и материалов по шкалам Мооса и Кнупа

Название минералов (материалов)	Твердость горных пород	
	по шкале Мооса	по шкале Кнупа
Тальк	1	12
Гипс	2	32
Известковый шпат	3	135
Плавиновый шпат	4	160
Апатит	5	400
Стекло	6	500
Кварц	7	1250
Топаз	8	1550
Корунд	9	1900
Карбид вольфрама	9,5	2800
Алмаз	10	8300

Залежи нефти и газа содержатся практически во всех типах осадочных горных пород, но преимущественно в песках, песчаниках, известняках, доломитах, поскольку они отличаются повышенной пористостью и представляют естественные вместилища – пласты-коллекторы, содержащие жидкие и газообразные углеводороды. Изредка углеводороды обнаруживают в вулканических (базальты), интрузивно-магматических (граниты) или метаморфических (гнейсы) породах. Более плотные породы – глины, плотные карбонаты – могут представлять пласты-коллекторы, если они достаточно трещиноваты.

Таким образом, при разработке математической модели электрогидравлического сверлящего перфоратора целесообразно учесть твердость горных пород, являющихся пластами-коллек-

торами, например, песчаника, известняка, доломита и т.д. При разработке математической модели электрогидравлического сверлящего перфоратора использовались данные, полученные с помощью метода определения твердости пород по Л. А. Шрейнеру [10, 11] (табл. 3).

Таблица 3

Твердость горных пород по методу Л. А. Шрейнера

Горная порода	Твердость, $p_{ш} \times 10^7$ Па
Гипс	25–40
Аргиллит и глинистые сланцы	20–75
Алеврит с карбонатным базальным цементом	70–90
Мрамор	95–130
Ангидрит	105–140
Известняк плотный	110–200
Песчаник среднезернистый с карбонатным цементом	170–300
Доломит плотный	250–320
Гранит	300–370
Базальт	390
Диорит кварцевый	410
Сиенит	570
Диабаз	630
Кварцит	580–630
Роговик эгириновый	800
Джеспилит	810

Для имитации влияния физико-механических свойств горных пород на процесс перфорации в математическую модель контура подачи бура (1) [12], где $K_{ПЭБ}$ – коэффициент противоэлектродвижущей силы в электрической цепи для гидрораспределителя (ГР) управления гидроцилиндром (ГЦ) подачи бура; $x_B(t)$ – перемещение золотника ГР управления ГЦ подачи бура; $U_{УПРБ}$ – напряжение электрической цепи постоянного тока в контуре подачи бура; R_B – активное сопротивление обмотки управления электромагнита в контуре подачи бура; $i_B(t)$ – функция силы тока в электрической цепи контура подачи бура; L_B – индуктивность обмотки управления электромагнита в контуре подачи бура; $m_{ЗБ}$, $m_{ТЦБ}$ – масса золотника ГР управления ГЦ подачи бура и ГЦ подачи бура соответственно; $b_{ЗБ}$ –

коэффициент, учитывающий трение в паре трения «плунжер – гильза» в контуре подачи бура; $c_{ПРБ}$ – жесткость пружины ГР управления ГЦ подачи бура; $K_{FiБ}$ – коэффициент силы тока в электрической цепи для ГР управления ГЦ подачи бура; μ – коэффициент расхода жидкости через золотник в ГР управления ГЦ фиксации; $f_{Б}$ – площадь золотника в ГР управления ГЦ подачи бура; $p_{Пит}$, $p_{Сл}$ – давления питания и слива гидросистемы; $p_{1Б}(t)$, $p_{2Б}(t)$ – давления рабочей жидкости в полостях ГЦ; ρ – плотность РЖ; $A_{ПБ}$, $A_{ЭФБ}$ – эффективная площадь поршня ГЦ подачи бура со стороны поршня и штока соответственно; $y_{Б}(t)$ – перемещение поршня гидроцилиндра ГЦ, перемещение инерционной нагрузки и перемещение корпуса ГЦ соответственно; $W_{ГЦБ}$ – объем РЖ в камере ГЦ подачи бура; E – приведенный модуль упругости РЖ; $R_{СТАТБ}$ – статическая нагрузка на ГЦ подачи бура; $b_{ГЦБ}$ – коэффициент, учитывающий силу вязкого демпфирования в ГЦ подачи бура, введенное выражение (2):

$$\left\{ \begin{aligned} U_{УПРБ} &= R_{Б} \cdot i_{Б}(t) + L_{Б} \cdot \frac{di_{Б}(t)}{dt} + K_{ПЭБ} \cdot \frac{dx_{Б}(t)}{dt}, \\ m_{3Б} \cdot \frac{d^2 x_{Б}(t)}{dt^2} + b_{3Б} \cdot \frac{dx_{Б}(t)}{dt} + c_{ПРБ} \cdot x_{Б}(t) &= \\ &= K_{FiБ} \cdot i_{Б}(t), \\ \mu \cdot f_{Б} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{Пит} - p_{1Б}(t)|}{\rho}} \times \\ \times \text{signum}(p_{Пит} - p_{1Б}(t)) &= \\ &= A_{ПБ} \cdot \frac{dy_{Б}(t)}{dt} + \frac{W_{ГЦБ}}{2 \cdot E} \cdot \frac{dp_{1Б}(t)}{dt}, \\ \mu \cdot f_{Б} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_{2Б}(t) - p_{Сл}|}{\rho}} \times \\ \times \text{signum}(p_{2Б}(t) - p_{Сл}) &= \\ &= A_{ЭФБ} \cdot \frac{dy_{Б}(t)}{dt} - \frac{W_{ГЦБ}}{2 \cdot E} \cdot \frac{dp_{2Б}(t)}{dt}, \\ m_{ГЦБ} \cdot \frac{d^2 y_{ГЦ}(t)}{dt^2} + R_{СТАТБ} \cdot \text{sign}\left(\frac{dy_{Б}(t)}{dt}\right) + \\ + b_{ГЦБ} \cdot \frac{dy_{Б}(t)}{dt} &= A_{ЭФБ} \cdot |p_{1Б}(t) - p_{2Б}(t)|, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$R_{П} \cdot \chi. \quad (2)$$

Здесь $R_{П}$ – сила, необходимая для разрушения породы; χ – коэффициент, учитывающий скорость вращения буровой головки и твердость горной породы.

Численное решение системы, состоящей из дифференциальных уравнений (1), (2), проводилось методом Рунге–Кутты 4–5-го порядка в математическом пакете Maple.

На первоначальном этапе моделирования рабочих процессов электрогидравлического сверлящего перфоратора необходимо учесть степень влияния физико-механических свойств горных пород на скорость перфорации канала электрогидравлическим сверлящим перфоратором представлены на рисунке.

Результаты расчета математической модели сверлящего перфоратора, представленной системой дифференциальных уравнений (1) с учетом физико-механических свойств горных пород (2), показывают, что даже при перфорировании относительно твердой породы (доломита) время перфорации канала составляет не более 2,5 мин, таким образом, по сравнению со сверлящим перфоратором ПС-112 и ЭЗБС время перфорации канала сократилось в 2 и 15 раз соответственно (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты моделирования рабочих процессов электрогидравлического сверлящего перфоратора. Разработанная математическая модель сверлящего перфоратора позволяет на основе численного метода решения сформированной системы дифференциальных уравнений производить моделирование гидросистемы скважинной аппаратуры с учетом твердости перфорируемых пород. По результатам численного моделирования установлено следующее:

- в процессе вторичного вскрытия продуктивных пластов основное время затрачивается на перфорацию горной породы. Таким образом, при исследовании гидросистемы электрогидравлического сверлящего перфоратора особое внимание следует уделить моделированию процесса перфорации с учетом различных физико-математических свойств пластов-коллекторов;

- на скорость перфорации канала существенно влияет нагрузка на буровой инструмент, что, в свою очередь, определяется физико-механическими свойствами перфорируемых пород. Установлено, что при перфорации доломита – одной из самых твердых углеводородо-держающих пород – время, затраченное на перфо-

рацию одного канала длиной 0,2 м, составляет менее 2,5 мин, тем самым увеличивается производительность работ по вторичному вскрытию продуктивных пластов щадящими методами, исключая растрескивание и разрушение цементного кольца, повышение заводненности добываемой нефти и нарушение изоляция пластов.

Дальнейшие исследования предполагается продолжить в направлении исследования процесса перфорации сложнопостроенных пластов-коллекторов, представленных тонким переслаиванием пород с различной пористостью и фильтрационно-емкостными свойствами, в частности, в основе теоретических исследований лежит разработка математической модели с учетом случайной нагрузки, имитирующей различные физико-механические свойства горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сверлящий перфоратор ПС-112/70. [Электронный ресурс]. URL: <http://vniigis.com/pdf/pmks/6.pdf> (дата обращения: 01.12.2014). [[*Boring perforating gun PS-112/70* [Online]. Available: <http://vniigis.com/pdf/pmks/6.pdf>]]

2. Гуляев П. Н., Жуланова М. И., Фролов Ю. Б. Сверлящая перфорация глубокого проникновения // *Нефтегаз INTERNATIONAL*. 2008. № 2. С. 33. [[P. N. Gulyaev, M. I. Zhulanova, Yu. B. Frolov, "Boring perforation of deep penetration," *Neftegaz INTERNATIONAL*, no. 2, p. 33, 2008.]]

3. Лягов А. В., Маликов Е. Л., Кузнецова Н. Ю. и др. Совершенствование технологии вторичного вскрытия и освоения скважин // *Нефтегазовое дело*. 2011. № 6. С. 160–175. [[A. V. Lyagov, E. L. Malikov, N. Yu. Kuznetsova, et al., "Improvement of technology of secondary opening and development of chinks," *Neftegazovoe delo*, no. 6, pp. 160-175, 2011.]]

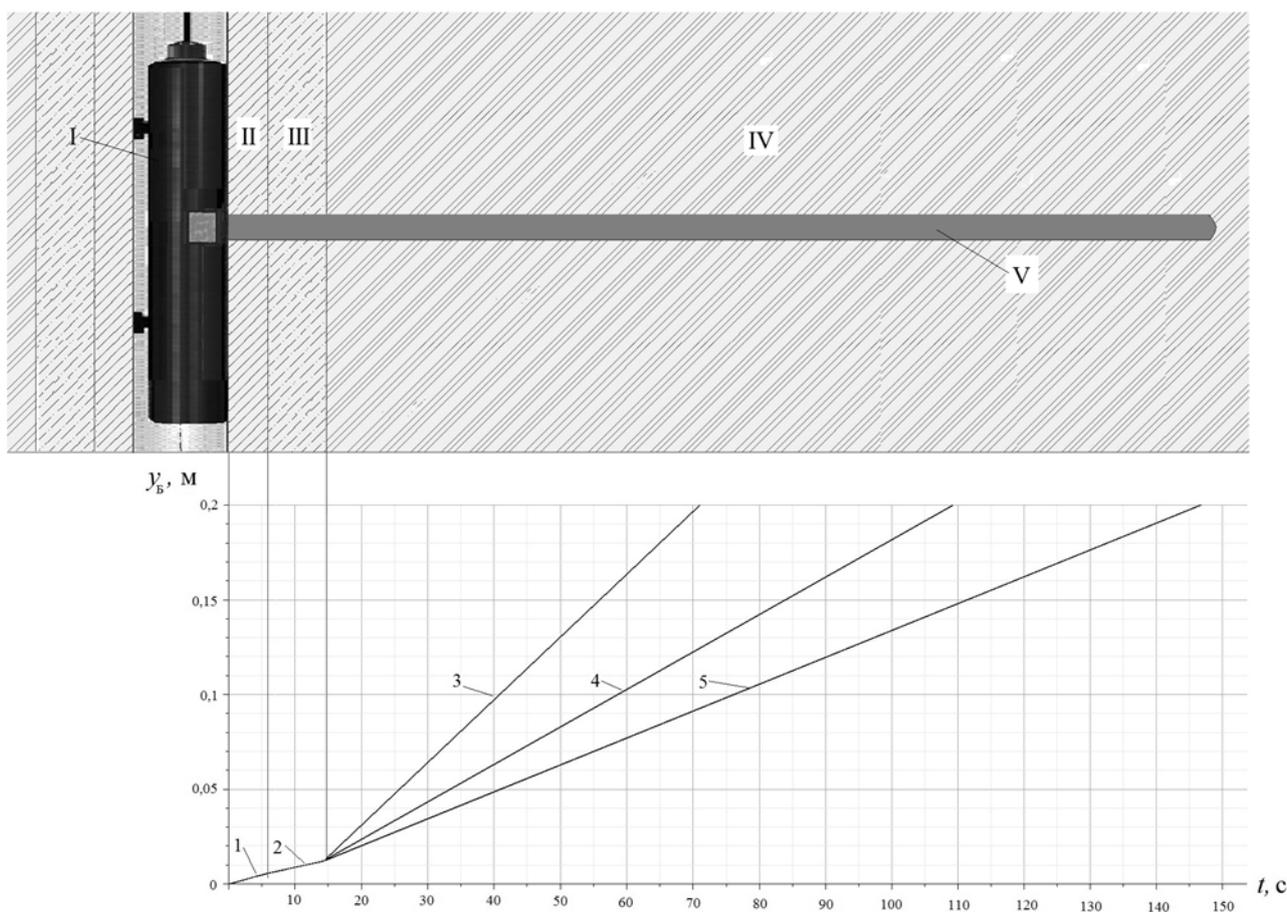


Рис.1. Влияние физико-механических свойств горных пород на скорость перфорации канала электрогидравлическим сверлящим перфоратором:
 I – электрогидравлический сверлящий перфоратор; II – цементное кольцо; III – обсадная труба;
 IV – продуктивный пласт; V – перфорационный канал;
 1 – перфорация обсадной колонны; 2 – перфорация цементного кольца;
 3, 4, 5 – перфорация песчаника, известняка и доломита соответственно

4. **ОАО** «Омское специальное конструкторское бюро приборов». Электробур для резки бокового ствола в продуктивном нефтяном (газовом) пласте ЭЗБС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oskbp.ru/index.php?id=20> (дата обращения: 01.12.2014). [[JSC "Omsk Special Design Bureau of devices", *Elektrobur for sidetracking in the productivity of oil (gas) reservoir ES*, [Online]. Available: <http://www.oskbp.ru/index.php?id=20>]]

5. **Сергиенко М. П.**, Шаров А. А., Метель Ю. Г. Способ вскрытия продуктивного пласта из скважины и устройство для его осуществления: пат. 2244104 РФ. Заявл. 30.04.2003. Опубл. 10.01.2005. Бюл. № 1. 6 с. [[М. P. Sergienko, A. A. Sharov, Yu. G. Metel. *A method of drilling-in a well and the device for its realization*: pat. 2244104 RF.]]

6. **Каркашадзе Г. Г.** Механическое разрушение горных пород. М.: Московский государственный горный университет, 2004. 222 с. [[G. G. Karkashadze, *Mechanical destruction of rocks*. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi gornyi universitet, 2004.]]

7. **Абатуров В. Г.** Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент. Тюмень: Нефтегазовый университет, 2007. 238 с. [[V. G. Abaturov, *Physical and mechanical properties of rocks and rock-breaking drilling tool*. Tyumen: Neftgazoviy universitet, 2007.]]

8. **Борщ-Компониц В. И.** Практическая механика горных пород. М.: Горная кн., 2013. 321 с. [[V. I. Borsch-Komponiets, *Practical rock mechanics*. Moscow: Gornaya kn., 2013.]]

9. **Физические** свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справочник геофизика / Под ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с. [[N. D. Dortman, *Physical properties of rocks and minerals (petrophysics): reference book of geoscientist*. Moscow: Nedra, 1984.]]

10. **Вадецкий Ю. В.** Бурение нефтяных и газовых скважин. М.: Академия, 2013. 352 с. [[Yu. V. Vadetsky, *Drilling oil and gas wells*. Moscow: Akademiya, 2013.]]

11. **Твердость** горных пород [Электронный ресурс]. URL: <http://www.drillings.ru/tverdost> (дата обращения: 01.12.2014). [[*Rock hardness* [Online]. Available: <http://www.drillings.ru/tverdost>]]

12. **Казакова Т. Г., Месропян А. В., Митягина М. О.** Разработка сверлящего перфоратора с электрогидравлической системой // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2012. № 1. С. 25–31. [[T. G. Kazakova, A. V. Mesropyan, M. O. Mityagina, "Development of the perforating gun with electrohydraulic system," *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz v neftyanoi promyshlennosti*, no. 1, pp. 25-31, 2012.]]

ОБ АВТОРАХ

МЕСРОПЯН Арсен Владимирович, проф. каф. прикладной гидромеханики. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1996). Д-р техн. наук по гидравлич. машинам и гидропневмоагрегатам (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. гидроприводов систем управления ЛА и гидрофицированных систем испытаний и вскрытия нефтеносных пластов.

МИТЯГИНА Мария Олеговна, ст. преп. каф. прикладной гидромеханики. М-р техн. и технол. в обл. гидр., вакуумн. и компресс. техники (УГАТУ, 2012). Канд. техн. наук по гидравлич. машинам и гидропневмоагрегатам (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. разработки и проектирования электрогидравлической аппаратуры для вторичного вскрытия пластов.

METADATA

Title: Research of influence physical and mechanical properties of rocks on working processes of the electrohydraulic boring perforating gun.

Authors: A. V. Mesropyan¹, M. O. Mityagina².

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹mesropyan@ugatu.ac.ru, ²volk-mmo@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 4 (70), pp. 28-33, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The mathematical model of electrohydraulic boring perforating gun, which takes into account the influence of the physical and mechanical properties of rocks on the rate of perforation of the channel in the reservoir. The transient of the movement of the hydraulic-cylinder rod feed borax on a flexible shaft is designed and constructed.

Key words: electrohydraulic boring perforating gun; HC-hydrocarbon; mathematic simulation.

About authors:

MESROPYAN, Arsen Vladimirovich, professor of Department applied hydromechanics. Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2010).

MITYAGINA, Mariya Olegovna, senior lecturer of Department applied hydromechanics. Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2013).