

Расчет технологических процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород

А.В. Ковалев, С.Я. Рябчиков, В.М. Горбенко, М.В. Горбенко, Л.А. Саруев
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Данная статья посвящена исследованию шароструйного способа бурения скважин, который в перспективе может повысить механическую скорость и проходку на долото при бурении скважин различного назначения в твердых горных породах. Шароструйный способ бурения скважин заключается в разрушении горных пород ударами металлических шаров, непрерывно циркулирующих в призабойной зоне скважины с помощью струйного аппарата, положенного в основу конструкции шароструйно-эжекторного бурового снаряда. Основными достоинствами шароструйного бурения являются простота конструкции бурового снаряда, отсутствие необходимости во вращении долота и создании на него осевой нагрузки. Разрушение горных пород ударами шаров может происходить в различных режимах, наиболее эффективным из которых является оптимальный (объемный), сопровождающийся образованием значительной воронки выкола. Целью настоящей работы является разработка методики расчета процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород.

Методика расчета базируется на полученных авторами результатах теоретических и экспериментальных исследований, а также некоторых положений предшественников. Она позволяет определить оптимальные геометрические параметры буровых снарядов, рациональные технологические параметры режима бурения, а также производить выбор насосного оборудования для конкретных геолого-технических условий. В предложенной методике расчета ограничиваются значения расхода промывочной жидкости при наличии в разрезе скважины интервалов, склонных к размыву стенок скважины, коэффициент эжекции струйного аппарата, а также перепад давления на сопле для предупреждения его интенсивного износа при истечении бурового раствора.

Ключевые слова: разрушение горных пород, породоразрушающий инструмент, шароструйное бурение, шароструйно-эжекторный буровой снаряд, струйный аппарат, твердые горные породы.

DOI: 10.18599/grs.18.2.5

Для цитирования: Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Горбенко В.М., Горбенко М.В., Саруев Л.А. Расчет технологических процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород. *Георесурсы*. 2016. Т. 18. № 2. С. 102-106. DOI: 10.18599/grs.18.2.5

Введение

Анализ технико-экономических показателей бурения геологоразведочных, водозаборных, взрывных и технических скважин в твердых горных породах свидетельствует о недостаточности высокой механической скорости бурения и проходки на долото. Увеличение эффективности механического способа бурения в твердых горных породах может быть реализовано двумя способами: созданием новых материалов и новых конструкций породоразрушающего инструмента (ПРИ).

Несмотря на постоянное совершенствование ПРИ, бурение механическими способами в твердых горных породах остается недостаточно эффективным. Поэтому актуальность приобретают разработка альтернативных способов разрушения горных пород. По мнению ряда исследователей (Давиденко, Игнатов, 2013; Ковалев и др., 2015; Кожевников, Давиденко, 1987) одним из наиболее перспективных является гидродинамический способ, реализуемый с помощью высокоскоростной струи. Данным способом возможно передавать на забой скважины значительную гидравлическую мощность, при этом скорость бурения и проходка на долото могуткратно возрастать.

Однако для бурения скважин в твердых горных породах данный способ в традиционном виде малоперспективен. Большой интерес представляет шароструйный способ бурения скважин, сущность которого состоит в разрушении горных пород на забое в результате воздействия стальных или твердосплавных шаров, движущихся с высокой скоростью и непрерывно циркулирующих в призабойной зоне за счет струйного аппарата. Данный способ

позволяет решить ряд технических и технологических проблем при реализации гидродинамического способа разрушения горных пород.

На рис. 1 представлена схема шароструйно-эжекторного бурового снаряда, разработанного на кафедре бурения скважин Национального исследовательского Томского политехнического университета (Kovalyov et al., 2015). Принцип его работы следующий: рабочая жидкость, подводимая через камеру подвода 1, ускоряется в сопле 2 и истекает из него в камеру смешения 5. При этом в пространстве, окружающем выход сопла 2 с внешней стороны, образуется зона разрежения. В корпусе снаряда выполнены впускные окна 4, через которые благодаря разрежению происходит всасывание рабочей жидкости с взвешенными шарами из затрубного пространства. Далее двухфазная

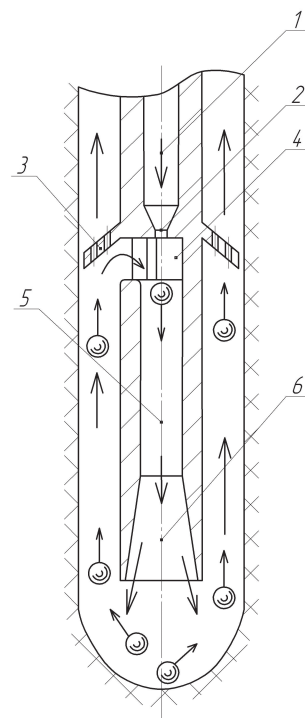


Рис. 1. Конструктивная схема шароструйно-эжекторного бурового снаряда: 1 – камера подвода рабочей жидкости; 2 – сопло; 3 – задерживающее устройство; 4 – впускные окна; 5 – камера смешения; 6 – диффузор.

смесь проходит через камеру смешения 5 и диффузор 6 с последующим ударом о горную породу, вызывая ее разрушение. Задерживающее устройство 3 предназначено для направления поднимающихся в затрубном пространстве породоразрушающих шаров во впускные окна, а также для центрирования бурового снаряда в скважине.

Основными достоинствами шароструйного бурения снарядами описанной конструкции являются:

- простота конструкции шароструйно-эжекторных буровых снарядов;
- отсутствие необходимости во вращении долота и создании на него осевой нагрузки.

Анализ работ, посвященных вопросам разрушения твердых горных пород при использовании шароструйно-эжекторных буровых снарядов, показывает, что данный способ может быть более эффективным по сравнению с традиционными. Результаты опытно-промышленного применения данного способа бурения (Уваков, 1969; Штрассер, 1966; Заурбеков, 1995) показывают, что при проходке пород VIII категории по буримости и выше возрастает значение механической скорости бурения по сравнению с использованием традиционного породоразрушающего инструмента. Так, проведенные Заурбековым С.А. промышленные испытания показали превышение механической скорости бурения нефтяных скважин диаметром 215,9 мм на 20% и проходки на долото на 43% по сравнению с шарошечными долотами (Заурбеков, 1995).

Режимы разрушения горных пород

Согласно результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований (Уваков, 1969; Штрассер, 1966) разрушение горных пород в результате воздействия ударов стальных или твердосплавных шаров может происходить в различных условиях. Режим разрушения породы определяется величиной контактных давлений при взаимодействии шара с породой, которая зависит от скорости их соударения.

На рис. 2 представлены режимы разрушения горных пород ударами шаров. Область 1 характеризует режим поверхностного истирания горной породы, при этом зависимость между скоростью бурения и величиной контактных давлений имеет линейный характер. Когда контактные давления превышают предел усталости горной породы, процесс разрушения становится усталостным. При этом интенсивность роста скорости бурения выше, чем интенсивность роста контактных давлений (область 2). При достижении контактными напряжениями значений твердости горной породы начинается эффективное разрушение. Зависимость скорости бурения от контактного давления вновь приобретает линейный характер (область 3), режим разрушения породы близок к оптимальному – процесс удара шара по забою завершается образованием крупного скола по контуру. При оптимальном режиме разрушения (область 4) контактные давления имеют значения, достаточные для осуществления первого скачка в разрушении с образованием крупной воронки выкола. Дальнейшее увеличение контактного давления не приводит к заметному повышению механической скорости бурения (Уваков, 1969).

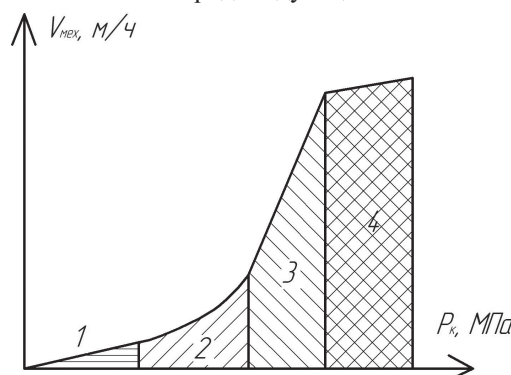


Рис. 2. Режимы разрушения горных пород ударами шаров: 1 – режим поверхностного истирания; 2 – усталостный режим разрушения; 3 – начальная стадия оптимального разрушения; 4 – оптимальное разрушение.

Разработка методики расчета технологических процессов в оптимальном режиме разрушения горных пород

Целью настоящей работы является создание методики расчета процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород на забое.

Представленная ниже методика расчета процесса шароструйного бурения при реализации оптимального режима разрушения горных пород позволяет определить оптимальные геометрические параметры буровых снарядов, рациональные технологические параметры режима бурения, а также производить выбор насосного оборудования для конкретных геолого-технических условий бурения.

Предлагаемая методика расчета базируется на полученных авторами результатах теоретических и экспериментальных исследований (Исаев и др., 2014; Ковалев и др., 2015; Константинов и др., 2015), а также некоторых положений А.Б. Увакова, В.В. Штрассера, Л.В. Леджервурда и др. (Леджервуд, 1961; Уваков, 1969; Штрассер, 1966).

Принципиальная схема шароструйного способа бурения представлена на рис. 3.

Исходными данными для расчета являются: свойства горных пород (динамическая твердость P_c , модуль упругости E_1 , коэффициент Пуассона μ_1); параметры скважины (диаметр $D_{скв}$, максимальная глубина бурения $L_{сквmax}$); свойства бурового раствора (плотность $\rho_{бр}$, динамическое напряжение сдвига τ_0 , динамическая вязкость η); геометрические параметры колонны бурительных труб (наружный d_n и внутренний d_v диаметры бурительных труб, наружный диаметр замкового соединения d_z , средняя длина бурительных труб l_{IT}); 5. свойства породоразрушающих шаров (плотность ρ_w , модуль упругости E_2 , коэффициент Пуансона μ_2).

Последовательность инженерного расчета технологических процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород следующая.

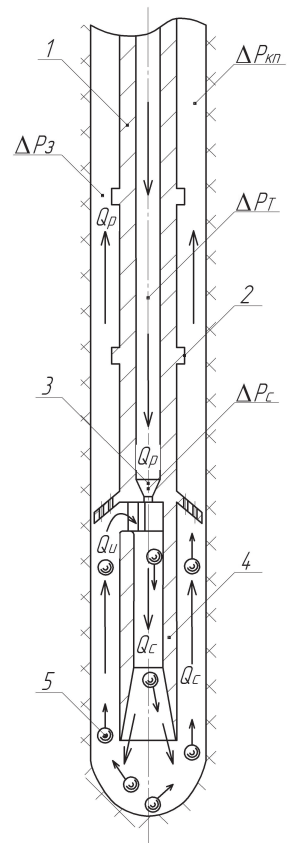


Рис. 3. Принципиальная схема шароструйного бурения: 1 – колонна бурительных труб; 2 – замки бурительных труб; 3 – сопло; 4 – буровой снаряд; 5 – шары.

1. Определяется рациональный диаметр шаров:

$$d_{ш} = \frac{D_{скв}}{6,6} \quad (1)$$

2. Рассчитывается диаметр и площадь сечения камеры смешения:

$$d_{кв} = 2,2d_{ш}, \quad (2)$$

$$S_{кв} = \frac{\pi d_{кв}^2}{4} \quad (3)$$

3. Вычисляется наружный диаметр бурового снаряда:

$$d_{бси} = D_{скв} - 2,2d_{ш} \quad (4)$$

4. Определяется длина камеры смешения:

$$l_{кв} = 8d_{кв} \quad (5)$$

5. Вычисляется высота технологических окон:

$$h_{мо} = 1,25d_{ш} \quad (6)$$

6. Рассчитывается оптимальная масса порции шаров:

$$m_{ш} = m_{ш} \cdot N_{ш} = \frac{\rho_{ш} \pi d_{ш}^3 N_{ш}}{6} \quad (7)$$

где $N_{ш}$ – количество поднимающихся шаров в затрубном пространстве, вычисляемое по формуле:

$$N_{ш} = \frac{l_{бс}}{d_{ш} C_1} \cdot \frac{\pi (d_{бс} + D_{скв})}{2d_{ш} C_2} \quad (8)$$

где C_1 – коэффициент, учитывающий зазор между рядами шаров, $C_1=1,5$; C_2 – коэффициент, учитывающий зазор между шарами в ряду $C_2=1,5$.

Формулы (1)-(8) получены на основе результатов проведенных авторами экспериментальных исследований.

7. Определяется скорость движения шаров, необходимая для разрушения горной породы в оптимальном режиме (Уваков, 1969; Штрассер, 1966):

$$v_{омм} = 2,15 \cdot \left(\frac{4(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{4(1-\mu_2^2)}{E_2} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{gP_c^5}{\rho_{ш} d_{ш}^3 \left(\frac{4}{d_{ш}} - \frac{4}{0,78D_{скв}} \right)^2}} \quad (9)$$

8. При проходке скважин с интервалами, склонными к размыву стенок, рассчитывается максимально возможный расход бурового раствора $Q_{рmax}$:

$$Q_{рmax} = S_{сквот} v_{кпmax}, \quad (10)$$

где $S_{сквот}$ – площадь сечения затрубного пространства между бурильными трубами и стенками скважины; $v_{кпmax}$ – максимально допустимая скорость течения жидкости в кольцевом пространстве, равная 1,5 м/с.

9. По техническим характеристикам бурового насоса выбирается расход Q_p , величина которого должна быть меньше величины максимально возможного расхода $Q_{рmax}$.

10. Величина необходимой средней скорости промывочной жидкости в буровом снаряде определяется по формуле:

$$V_{бс} = V_{омм} / \varepsilon, \quad (11)$$

где ε – отношение скорости шаров к скорости жидкости в буровом снаряде, принимается равным 0,7 (Eckel et al., 1956).

11. Определяется требуемый коэффициент эжекции:

$$n = \frac{S_{кв} v_{бс}}{Q_p} - 1. \quad (12)$$

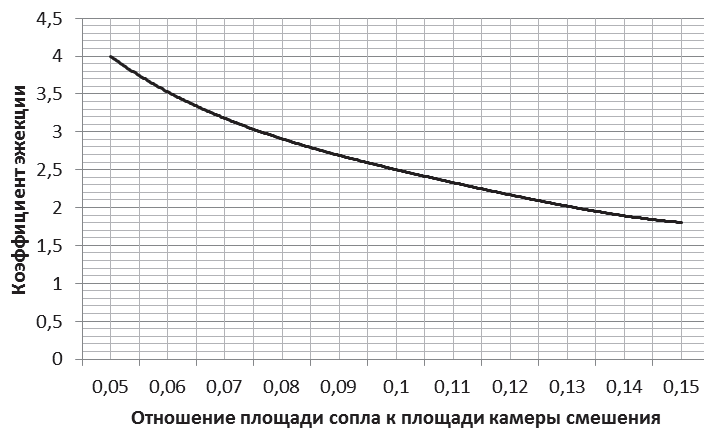


Рис. 4. Зависимость коэффициента эжекции от отношения площади сопла к площади камеры смешения (Eckel et al., 1956).

12. Проверяется возможность подъема шаров в зазоре между долотом и стенками скважины, т.е. сравнивается скорость жидкости при ее течении между буровым снарядом и стенками скважины со скоростью падения шаров при переходном и турбулентном режимах обтекания шаров, рассчитанной по формуле Риттингера:

$$v_{кп} = \frac{Q_c}{S_{квбс}} = \frac{4(1+n)Q_p}{\pi (D_{скв}^2 - d_{бс}^2)} \geq 5,11 \sqrt{\frac{d_{ш} (\rho_{ш} - \rho_{бр})}{\rho_{бр}}} \quad (13)$$

13. По графику зависимости коэффициента эжекции от отношения площади сопла к площади камеры смешения (Рис. 4) при неизменном диаметре камеры смешения определяется требуемое отношение $\alpha = S_c / S_{кв}$.

Установлено, что значения коэффициента эжекции, в диапазоне значений от 2 до 4, являются наиболее приемлемыми. В случае его превышения ухудшаются условия выноса шлама, в результате чего уменьшается КПД струйного аппарата, и затрачивается дополнительная энергия на его измельчение.

14. Определяется диаметр и площадь выходного сечения сопла:

$$S_c = \alpha \cdot S_{кв}, \quad (14)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c \cdot \alpha}{\pi}} \quad (15)$$

15. Перепад давления в сопле вычисляется по формуле (Попов и др., 2003):

$$\Delta P_c = \frac{Q_p^2 \cdot \rho_{бр}}{\gamma^2 \cdot 2 \cdot S_c^2}, \quad (16)$$

где γ – коэффициент расхода сопла, для коноидальных сопел равный 0,985.

Согласно (Кирсанов и др., 1981; Попов и др., 2003) рассчитанный перепад давления в сопле должен быть не более 13 МПа для предупреждения интенсивного износа сопла при течении через него бурового раствора.

16. По общеизвестным методикам рассчитываются потери давления в циркуляционной системе $\Sigma(\Delta P_i)$:

$$\Sigma(\Delta P_i) = \Delta P_T + \Delta P_{кп} + \Delta P_3, \quad (17)$$

где ΔP_T – потери давления в бурильной колонне, $\Delta P_{кп}$ – потери давления в затрубном пространстве, ΔP_3 – потери давления в зазоре между замками и стенками скважины.

В связи с малыми значениями не учитываются потери давления в следующих элементах циркуляционной системы: стояке, буровом рукаве, вертлюге, ведущей трубе и

задерживающем устройстве бурового снаряда.

17. Исходя из величин Q_p , ΔP_c , $\Sigma(\Delta P_i)$, выбираются параметры бурового насоса. При этом необходимо руководствоваться следующими условиями:

$$Q_H \geq Q, \quad (18)$$

$$kP_H > \Sigma(\Delta P_i) + \Delta P_c, \quad (19)$$

где Q_H и P_H – расход и развиваемое давление одного или нескольких буровых насосов; k – коэффициент, учитывающий то, что рабочее давление нагнетания бурового насоса должно быть, согласно правилам ведения буровых работ, меньше паспортного на 20-30 %, $k=0,7-0,8$ (Попов и др., 2003).

Выводы

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика расчета процессов шароструйного бурения при оптимальном режиме разрушения горных пород на забое, которая позволяет определять оптимальные геометрические параметры буровых снарядов, рациональные технологические параметры режима бурения, а также производить выбор насосного оборудования для конкретных геолого-технических условий.

2. В предложенной методике расчета шароструйного бурения необходимо учитывать следующие ограничения:

- при проходке скважин с интервалами, склонными к размытию ее стенок необходимо ограничить скорость восходящего потока путем введения значения предельного расхода промывочной жидкости;
- для улучшения условий выноса шлама следует проектировать буровые снаряды с коэффициентом эжекции, не превышающим 4;
- рассчитанный перепад давления в сопле не должен быть более 13 МПа для предупреждения интенсивного износа сопла при течении через него бурового раствора.

Литература

- Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин. Днепропетровск: НГУ. 2013. 110 с.
- Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин. Автореф. дис. канд. техн. наук. Алматы. 1995. 18 с.
- Исаев Е.Д., Ковалев А.В., Алиев Ф.Р. Экспериментальные исследования технологических параметров режима шароструйного бурения. Сб. докладов Всерос. научно-технической конф. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та. 2014. С. 68-83.
- Кирсанов А.Н., Зиненко В.П., Кардыш В.Г. Буровые машины и механизмы. М: Недра. 1981. 448 с.
- Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Алиев Ф.Р., Якушев Д.А., Горбенко В.М. Проблемы гидродинамических способов бурения скважин и основные направления для их решения. Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 3. С. 6-12.
- Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Веревкин А.В., Исаев Е.Д., Алиев Ф.Р. Определение оптимальной массы технологической порции шаров при шароструйном бурении. Горный информационно-ана-

литический бюллетень. 2015. № 6. С. 339-345.

Ковалев А.В., Рябчиков С.Я., Горбенко В.М., Исаев Е.Д., Алиев Ф.Р. Экспериментальные исследования влияния технологических параметров шароструйного бурения на диаметр скважины. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 346-352.

Кожевников А.А., Давиденко А.Н. Гидромеханический и эрозийный способы разрушения горных пород при бурении скважин. М: ВИЭМС. 1987. 45 с.

Константинов Т.Е., Исаев Е.Д. Экспериментальные исследования шароструйно-эжекторных снарядов с целью разработки методики для их расчета. Труды XIX Межд. симпозиума «Проблемы геологии и освоения недр». Томск: Изд. ТПУ. 2015. С. 392-397.

Леджервуд Л.У. Обзор работ по созданию усовершенствованных способов бурения нефтяных скважин. М: ГОСИНТИ. 1961. 258 с.

Попов А.Н., Спивак А.И., Акбулатов Т.О. и др. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. М: Недра. 2003. 509 с.

Уваков А.Б. Шароструйное бурение. М: Недра. 1969. 207 с.

Штрассер В.В. Исследование процессов разрушения горных пород ударами шаров (к теории шароструйного бурения). Дис. канд. техн. наук. Алма-Ата. 1966. 217 с.

Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Petroleum Transactions, Aime*. Dallas. 1956. V. 207.

Kovalyov A.V. Ryabchikov S.Ya., Isaev Ye.D., Aliev F.R., Gorbenko M.V., Strelnikova A.B. Designing the ejector pellet impact drill bit for hard and tough rock drilling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2015. V. 24. URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012016>

Сведения об авторах

Артем Владимирович Ковалев – старший преподаватель, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634034, Томск, пр. Ленина, 43А

Тел: +7(952) 889-03-95, e-mail: arteka011287@mail.ru

Сергей Яковлевич Рябчиков – доктор тех. наук, доцент, профессор-консультант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634034, Томск, пр. Ленина, 43А

Вячеслав Михайлович Горбенко – ведущий инженер Технологического отдела; аспирант кафедры теоретической и прикладной механики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634034, Томск, пр. Ленина, 43А

Михаил Владимирович Горбенко – канд. тех. наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634034, Томск, пр. Ленина, 43А

Лев Алексеевич Саруев – доктор тех. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634034, Томск, пр. Ленина, 43А

Статья поступила в редакцию 25.02.2016

Calculation of Ball Jet Drilling Processes in the Optimal Mode of Rock Destruction

A.V. Kovalyov, S.Ya. Ryabchikov, V.M. Gorbenko, M.V. Gorbenko, L.A. Saruev
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. This article is devoted to the study of ball jet drilling method, which in the future may increase the mechanical speed and driving of the bit during drilling of solid rocks for various purposes. Ball jet method of drilling wells is to destroy rocks by strikes of metal balls continuously circulating in the near wellbore area by means of a jet system, laid to the basis of ball jet – ejector drilling unit. The main advantages of ball jet drilling include simplicity of drill construction, absence of necessity in the bit rotation and creation of axial load on it. Destruction of rocks by ball strikes can occur in a variety of modes, the most effective of which is the optimal (volumetric), accompanied by the formation of a large chipping funnel. The aim of this work is to develop methods for calculating ball jet drilling processes in the optimal mode of rock destruction.

Method of calculation is based on the results obtained by the authors of theoretical and experimental studies, as well as some provisions of the predecessors. It allows us to determine the optimal geometric parameters of the drilling units, rational technological parameters of drilling mode, and also to make the choice of pumping equipment for specific geological and technical conditions. In the proposed calculation method the values of the washing liquid flow are limited in the presence of intervals intent to erosion of the borehole walls, the ejection rate of the jet device and the pressure drop on the nozzle to prevent its intense wear at the expiration of the drilling fluid.

Keywords: destruction of rocks, rock destruction tool, ball jet drilling, ball jet - ejector drilling unit, jet device, solid rocks.

References

- Davidenko A.N., Ignatov A.A. Abrazivno-mekhanicheskoe udarnoe burenie skvazhin [Abrasive mechanical percussion drilling]. Dnepropetrovsk: NGU. 2013. 110 p. (In Russ.)
- Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Petroleum Transactions, Aime*. Dallas. 1956. V. 207.
- Isaev E.D., Kovalyov A.V., Aliev F.R. Eksperimental'nye issledovaniya tekhnologicheskikh parametrov rezhima sharostruynogo bureniiya [Experimental research of technological parameters of the ball jet drilling mode]. *Sb. dokladov Vseros. nauchno-tekhn. konf.* [Proc. All-Russian Sci. and Tech. Conf.]. Tomsk: Publ. house of Tomsk Polytechnic University. 2014. Pp. 68-83. (In Russ.)
- Kirsanov A.N., Zinenko V.P., Kardyshev V.G. Burovnye mashiny i mekhanizmy [Drilling machines and mechanisms]. Moscow: Nedra Publ. 1981. 448 p. (In Russ.)
- Konstantinov T.E., Isaev E.D. Eksperimental'nye issledovaniya sharostruyno-ezhektornykh snaryadov s tsel'yu razrabotki metodiki dlya ikh rascheta [Experimental studies of the ball jet-ejector drilling units in order to develop methodology for calculating them]. *Trudy XIX Mezhd. simpoziuma «Problemy geologii i osvoeniya nedr»* [Proc. XIX Int. Symposium «Problems of Geology and exploitation of the Earth interior»]. Tomsk: Izd. TPU. 2015. Pp. 392-397. (In Russ.)
- Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Aliev F.R., Yakushev D.A., Gorbenko V.M. Problemy gidrodinamicheskikh sposobov bureniiya skvazhin i osnovnye napravleniya dlya ikh resheniya [Problems of the hydrodynamic methods of drilling and the main directions for their solution]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2015. V. 326. No. 3. Pp. 6-12. (In Russ.)
- Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Verevkin A.V., Isaev E.D., Aliev F.R. Opredelenie optimal'noy massy tekhnologicheskoy portsii sharov pri sharostruynom burenii [Estimation of pellet optimal technological portion during pellet impact drilling]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. Moscow: Gornaya kniga Publ. 2015. No. 6. Pp. 339-345. (In Russ.)
- Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Gorbenko V.M., Isaev E.D., Aliev F.R. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov sharostruynogo bureniiya na diametr skvazhiny [Experimental studies of technological parameters influence on well diameter during pellet impact drilling]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. Moscow: Gornaya kniga Publ. 2015. No. 6. Pp. 346-352. (In Russ.)
- Kovalyov A.V. Ryabchikov S.Ya., Isaev Ye.D., Aliev F.R., Gorbenko M.V., Strelnikova A.B. Designing the ejector pellet impact drill bit for hard and tough rock drilling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2015. V. 24. URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012016>
- Kozhevnikov A.A., Davidenko A.N. Gidromekhanicheskii i erozionnyy sposoby razrusheniya gornykh porod pri burenii skvazhin. [Hydromechanic and erosive methods of rocks destruction in the process of drilling]. Moscow: VIEMS. 1987. 45 p. (In Russ.)
- Ledzhervud L.U. Obzor rabot po sozdaniyu usovershenstvovannykh sposobov bureniiya neftyanykh skvazhin [Review of works on developing the improved methods of oil drilling]. Moscow: GOSINTI. 1961. 258 p. (In Russ.)
- Popov A.N., Spivak A.I., Akbulatov T.O. et al. Tekhnologiya bureniiya neftyanykh i gazovykh skvazhin [The technology of drilling oil and gas wells]. Moscow: Nedra Publ. 2003. 509 p. (In Russ.)
- Shtrasser V.V. Issledovanie protsessov razrusheniya gornykh porod udarami sharov (k teorii sharostruynogo bureniiya) [Investigation of the processes of rocks destruction by hitting balls (toward the theory of ball jet drilling)]. Diss. kand. techn. nauk. [Cand. techn. sci. diss.]. Alma-Ata. 1966. 217 p. (In Russ.)
- Uvakov A.B. Sharostruynoe burenie [Ball jet drilling]. Moscow: Nedra Publ. 1969. 207 p. (In Russ.)
- Zaurbekov S.A. Povyshenie effektivnosti prizaboynykh gidrodinamicheskikh protsessov pri sharostruynom burenii skvazhin [Improving the efficiency of bottomhole hydrodynamic processes during the ball jet drilling]. Avtoref. Diss. kand. techn. nauk [Abstract Cand. techn. sci. diss.]. Almaty. 1995. 18 p. (In Russ.)

For citation: Kovalyov A.V., Ryabchikov S.Ya., Gorbenko V.M., Gorbenko M.V., Saruev L.A. Calculation of Ball Jet Drilling Processes in the Optimal Mode of Rock Destruction. *Georesursy = Georesources*. 2016. V. 18. No. 2. Pp. 102-106. DOI: 10.18599/grs.18.2.5

Information about authors

Artem V. Kovalev – Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University

Russia, 634034, Tomsk, Lenina av., 43A

Phone: +7(952) 889-03-95, e-mail: arteka011287@mail.ru

Sergey Ya. Ryabchikov – Doctor of Science (Techn.), dotsent, professor-konsultant, National Research Tomsk Polytechnic University

Russia, 634034, Tomsk, Lenina av., 43A

Vyacheslav M. Gorbenko – Leading Engineer of the Technology division; PhD student of the Chair of Theoretical and Applied Mechanics, National Research Tomsk Polytechnic University

Russia, 634034, Tomsk, Lenina av., 43A

Mikhail V. Gorbenko – PhD (Techn.), Associate Professor of the Chair of Theoretical and Applied Mechanics, National Research Tomsk Polytechnic University

Russia, 634034, Tomsk, Lenina av., 43A

Lev A. Saruev – Doctor of Science (Techn.), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University

Russia, 634034, Tomsk, Lenina av., 43A

Manuscript received February 25, 2016