

УДК 622.243.92

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

## ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИНТОВЫХ ЗАБОЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.Ф. Балденко, А.В. Вервекин<sup>1</sup>, В.М. Плотников<sup>2</sup>

ОАО НПО «Буровая техника» – ВНИИБТ (115114, Россия, г. Москва, ул. Летниковская, 9, стр. 1)

<sup>1</sup>ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (109028, Россия, г. Москва, Покровский бульвар, 3, стр. 1)

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

## WAYS TO FURTHER IMPROVEMENT OF WELL DRILLING BY DOWNHOLE DRILLING MOTORS

D.F. Baldenko, A.V. Vervekin<sup>1</sup>, V.M. Plotnikov<sup>2</sup>

Scientific and Production Center Drilling Equipment OJSC – ARSIDE (9 Letnikovskaia st., Building 1, Moscow, 115114, Russian Federation)

<sup>1</sup>LUKOIL-Engineering LLC (3 Pokrovskii blvr., Building 1, Moscow, 109028, Russian Federation)

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 30.03.2016. Принята / Accepted: 20.04.2016. Опубликована / Published: 30.06.2016

### Ключевые слова:

винтовой забойный двигатель (ВЗД), стендовая характеристика ВЗД, технология управления ВЗД, контроль гидравлической энергии, дифференциальный перепад давления, скорость проходки.

В последнее время изучение элементов оперативного управления технологией углубления скважины ведется в направлении проектирования. Известные комплексы зарубежных и отечественных компьютерных программ (в том числе практика морского бурения) базируются на применении (как правило, степенных) уравнений при описании процесса разрушения забоя долотом и, соответственно, в большей мере не обладают способностью адаптироваться к частым изменениям физико-механических свойств пород, при этом в меньшей мере в изотропных породах. Поэтому для увеличения коммерческой скорости строительства скважин необходим комплексный подход в управлении процессом углубления скважины с опорой на предложенные новые элементы технологии (характер изменения рабочего давления, темп подачи бурового инструмента), с учетом автоматизации процесса строительства скважин. В результате проведенных практических и теоретических исследований эксплуатационных особенностей применения винтовых забойных двигателей модель оперативного управления технологией строительства скважины представлена в виде свода наиболее важных элементов, влияющих на управление процессом строительства. Приводятся характерные системные элементы управления эффективной технологией отработки винтовых забойных двигателей в сравнении с существующей практикой управления технологией углубления. Предложенная модель управления технологией учитывает системно-аналитический подход с четким выделением подсистем и систем, в которых эффективно и полно реализуется подведенная к ним гидравлическая энергия, с учетом систем, в которые она передается. Вопрос о контроле эффективной технологии углубления скважины по элементам оперативного управления до сих пор остается дискуссионным. Авторы сформулировали проблемы поиска оптимальных режимов бурения винтовыми забойными двигателями в условиях неограниченного изменения физико-механических свойств пород в процессе углубления скважин. Практическая реализация эффективной технологии углубления скважин предполагает решение ряда задач.

### Key words:

downhole drilling motor, test bench parameters of downhole drilling motor, technology for downhole drilling motor operating, control of hydraulic energy, differential pressure drawdown, drilling rate.

Recently, the study of elements of on the fly operation of well technology is carried out in design direction. Famous systems of foreign and domestic computer programs (including practice of offshore drilling) are based on application equations (as a rule, power) when describing process of bottom hole break by drilling bit. That cannot be adapted to frequent changes of physical and mechanical rock properties and less in isotropic rocks. Therefore, to increase speed of well construction it requires an integrated method to operate process of well drilling based on proposed new technologies (change of pressure and rate of drilling equipment lowering) with accounted automation of well construction process. As a result of practical and theoretical studies of application of downhole drilling motors the model of on the fly operation of well drilling is presented in form of set containing most important elements that influence construction processes. Paper presents characteristic elements of the system to control efficiency of downhole drilling motors comparing to existing practice of control well construction. Proposed model drilling control takes into account system and analytical approach with a clear allocation of subsystems and systems that are effectively and fully implemented with provided hydraulic energy. The issue of control efficient well drilling by elements of on the fly operations is still controversial. The authors formulated problems of search of optimal drilling regimes under conditions of unlimited change of physical and mechanical rock properties during well drilling. Practical implementation of efficient well construction technology could overcome several challenges.

**Балденко Дмитрий Федорович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник (моб. тел.: +007 922 340 07 64, e-mail: dbaldenko@integra.ru).

**Вервекин Андрей Валерьевич** – кандидат технических наук, главный специалист отдела новых технологий бурения Управления технологий бурения и заканчивания скважин (моб. тел.: +007 985 100 13 77, e-mail: 60000000000@bk.ru). Контактное лицо для переписки.

**Плотников Валерий Матвеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовых технологий (моб. тел.: +007 919 495 61 15, e-mail: vmplotnikov@mail.ru).

**Dmitrii F. Baldenko** (Author ID in Scopus: 6507384715) – Doctor of Engineering, General Researcher (mob. tel.: +007 922 340 07 64, e-mail: dbaldenko@integra.ru).

**Andrei V. Vervekin** (Author ID in Scopus: 55749754400) – PhD in Engineering, General Expert of New Drilling Technologies Office of the Department of Well Drilling and Completion Technologies (mob. tel.: +007 985 100 13 77, e-mail: 60000000000@bk.ru). The contact person for correspondence.

**Valerii M. Plotnikov** (Author ID in Scopus: 7103007559) – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Oil and Gas Technologies (mob. tel.: +007 919 495 61 15, e-mail: vmplotnikov@mail.ru).

## Введение

В последнее десятилетие винтовые забойные двигатели (ВЗД) превратились в основное техническое средство привода породоразрушающего инструмента.

В России, родоначальнице многозаходных ВЗД, был проведен комплекс научно-исследовательских опытных и конструкторских работ (НИОКР), результатом которого явилась разработка гаммы типоразмеров двигателей (более 60), позволяющих эффективно проводить буровые работы практически со всеми типами долот [1]. Только в России за годы промышленного применения ВЗД пробурено около 100 млн горных пород. Однако на фоне значительного роста производства ВЗД, на наш взгляд, существенно отстают работы по разработке и внедрению энергоэффективной технологии управления ВЗД и специальных элементов компоновки низа бурильной колонны (гидравлических нагружателей, осцилляторов, амортизаторов и др.).

Поэтому актуально выделить ряд проблем бурения скважин с применением винтовых забойных двигателей:

1. Нормативная технология управления процессом бурения основана на контроле одного из параметров режима бурения – поддержании осевой нагрузки на долото. Данный традиционный способ берет свое начало от роторного бурения. Один из недостатков нормативной технологии в том, что способ не учитывает влияние гидравлического канала на энергетику винтового забойного двигателя и оперирует косвенным значением осевой нагрузки, в особенности при бурении наклонно направленных и горизонтальных скважин со сложными профилями.

2. В процессе проектирования режимов бурения и способа углубления скважины ряд задач увеличения коммерческой скорости строительства скважин решается без учета преобладающего влияния на механическую скорость бурения некоторых факторов и параметров, которые обуславливают различный вид выражений для расчета коэффициента полезного действия (КПД) процесса бурения.

Этот коэффициент характеризует способ и условия углубления скважины, характер изменения свойств горных пород, реализацию и формирование осевой нагрузки на забой скважины и долото и др.

3. Уровень внедрения и оперирования базовыми элементами оперативного управления технологией. Изучение элементов оперативного управления технологией углубления скважины ведется в направлении проектирования (корректировка с целью выявления оптимальных проектных параметров режима бурения на основании оперативной информации, полученной в процессе бурения скважины, и реализация их в текущем или предстоящем долблении). В полном объеме (от оперативного выбора уточненных параметров до расчета ожидаемых показателей бурения) работа проектирования в отечественной практике пока не реализована.

4. Проблемы комплексов зарубежных и отечественных компьютерных программ (в том числе практика морского бурения). Алгоритмы базируются на применении (как правило, степенных) уравнений при описании процесса разрушения забоя долотом и, соответственно, в большей мере не обладают способностью адаптироваться к частым изменениям свойств пород, при этом в меньшей мере в изотропных породах.

### **Управление подводимой гидравлической энергией при разрушении горных пород в процессе бурения скважин винтовыми забойными двигателями**

Разрушение горной породы – основной процесс при строительстве нефтяных и газовых скважин, требующий глубокого изучения, от скорости процесса углубления зависит срок строительства скважины. Опираясь на механические свойства породы, а также руководствуясь характеристикой породоразрушающего инструмента в совокупности с характеристикой привода, необходимо привести общие зависимости – физико-механические свойства горной породы, крутящий момент на приводе, энергопотребление долота и т.д.

Горные породы разрушаются вследствие отрыва (от нормальных напряжений) или сдвига, скалывания, среза (от касательных напряжений). При сжатии порода разрушается преимущественно на скалывание, при растяжении – на отрыв. Разрушение горных пород – процесс сложный, и скалывание и отрыв сопровождают друг друга. Процесс разрушения требует времени и происходит постепенно, но с различной скоростью. Разрушение происходит по контактными поверхностями отдельных минеральных зерен. Продолжительность разрушения для одной и той же породы при прочих равных условиях определяется нагрузкой, температурой, активностью среды, напряженным состоянием и т.д. [2–5]. При бурении скважины разрушение горных пород долотами различного типа может быть поверхностным и объемным. Первый вид разрушения обычно неэффективен. При объемном типе разрушения по [6–8] разрушение породы долотом можно рассматривать как процесс вдавливания в породу наколенника (штампа) с плоским и криволинейным основаниями.

Различаются три фазы напряженного состояния породы под штампом:

- уплотнение (затухание деформации);
- предельное равновесие (разрывы и сдвиги);
- разрушение.

В [9] твердость горных пород является одним из свойств, представляющих интерес с позиции механики разрушения. В процессе бурения на шарошечное долото действуют статические и динамические силы. Распределение нагрузки зависит от физико-механических свойств разрушаемых пород. В [10] введено следующее определение: пластичность – это способность материала к увеличению интенсивности деформирования по мере роста нагрузки и к сохранению остаточной деформации после снятия нагрузки. В практике бурения используется еще одна характеристика горных пород – буримость [10]. Буримость – это свойство горной породы, которое характеризует ее разрушаемость на ограниченной поверхности забоя скважины. Это относительная характеристика, зависящая от уровня развития техники

и технологии бурения. Мера буримости той или иной горной породы – средняя скорость углубления ствола скважины.

На забое скважины горная порода находится в условиях напряженного состояния. На нее действует давление в контакте с породоразрушающим инструментом, гидростатическое давление столба жидкости в скважине, поровое (или пластовое) давление жидкости, находящейся в порах, и другие факторы.

Разрушение горной породы на забое скважины представляет собой сложный энергетический процесс [10]. На углубление скважины расходуется только небольшая часть подведенной к породоразрушающему инструменту мощности, а преобладающую ее долю составляют неизбежные потери. Полезно расходуемая мощность идет на разрушение горной породы на забое. Доля мощности, расходуемой непосредственно на разрушение горной породы на забое, составляет несколько процентов от подведенной (по данным А.И. Спивака, 2–15 %), а физический коэффициент полезного действия, определяемый по расходу энергии на образование новой свободной поверхности частиц шлама, оказывается еще меньше (по данным Л.А. Шрейнера, около 0,01 %). Распределение подведенной мощности, КПД ее использования в одной и той же породе в значительной степени зависят от условий работы породоразрушающего инструмента, которые определяются различными факторами, и в первую очередь технологическим режимом бурения. По [10], реализуемая через долото мощность, приходящаяся на 1 см его диаметра, может достигать 5–10 кВт, статическая осевая нагрузка – 10–15 кН. Динамическая осевая нагрузка может превышать статическую в 1,5–2,0 раза.

В [11] показано, что теоретическое представление о механике разрушения горной породы может отличаться от практического. Один из главных вопросов в бурении – это методы управления подводимой гидравлической мощностью. Именно дозирование гидравлической мощности через дифференциальный перепад давления на винтовом забойном двигателе определяет крутящий момент. При этом необходимо

учитывать, что буровые долота имеют различное потребление гидравлической мощности и это напрямую зависит от конструкции долота (к примеру, от количества лопастей, угла установки резцов и т.д.). Рассмотрим, например, влияние осевой нагрузки на крутящий момент при проходке в различных породах (рисунок).

На рисунке показано, что при одинаковой осевой нагрузке  $G$  резец PDC внедряется в мягкую породу (позиция 1), вследствие этого на ВЗД появляется крутящий момент  $M_1$  и образуется стружка высотой  $H_1$ . При внедрении резца PDC в более твердую породу (позиция 2) возникает момент  $M_2$  и стружка высотой  $H_2$ . В связи с этим определим следующее условие: при

$$G = \text{const } M_1 > M_2, H_1 > H_2. \quad (1)$$

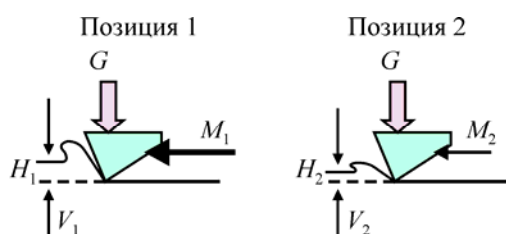


Рис. Влияние осевой нагрузки на крутящий момент [11]

Условие справедливо для разной степени буримости горных пород. Так как в реальных условиях буримость постоянно изменяется, то определить величину осевой нагрузки расчетным путем при известном крутящем моменте на долоте или на роторе очень сложно, а чаще невозможно.

При условии (1) скорость проходки  $V$  пропорциональна скорости вращения долота  $n$  и высоте снимаемой за оборот стружки  $H$  и имеет следующую зависимость:

$$V_1 = H_1 n_1, V_2 = H_2 n_2. \quad (2)$$

Винтовой двигатель при бурении работает в номинальном режиме, который равен примерно 1/3 режима максимальной мощности, в этом режиме частота вращения вала отличается незначительно, поэтому  $n_1$  можно на практике считать равным  $n_2$ , а скорость пропорциональна толщине стружки, т.е.

$$V_1 = H_1 n, V_2 = H_2 n, \quad (3)$$

где  $n$  – скорость вращения вала в номинальном режиме.

На поверхности оператор (бурильщик) может контролировать забойные условия по дифференциальному перепаду  $P_{\text{диф}}$  на ВЗД.

Изменение  $P_{\text{диф}}$  при постоянном расходе промывочной жидкости и постоянной осевой нагрузке свидетельствует об изменении условий бурения.

Повышение эффективности технологии бурения нефтяных и газовых скважин ВЗД заключается главным образом в автоматизации процесса бурения и эксплуатации забойных двигателей по двум параметрам:

1. Контроль темпа изменения давления в нагнетательной линии и поддержания заданного дифференциального перепада давления на ВЗД. Контроль темпа изменения давления обеспечит более эффективную эксплуатацию оборудования в перемежающихся пропластках горных пород разной буримости.

2. Поддержание заданного дифференциального перепада на ВЗД, в свою очередь:

- 2.1. Обеспечит стабильную работу ВЗД.

- 2.2. Обеспечит постоянный крутящий момент на долоте – постоянство крутящего момента обеспечивает постоянный угол закручивания бурильной колонны.

- 2.3. Уменьшит колебания низа бурильной колонны.

- 2.4. Позволит повысить гарантированный межремонтный период ВЗД без конструктивных изменений и уменьшить количество спуско-подъемных операций, что, в свою очередь, приведет к росту скорости бурения, сокращению сроков строительства скважин и к снижению аварий, происходящих от перегрузок.

В [13] приведены некоторые индикаторы состояния процесса бурения на забое:

1. Дифференциальный перепад давления на ВЗД, регистрируемый крутящий момент на роторе, темп изменения дифференциального перепада давления в манифольдной линии. Оснащение бурового станка и возможность увидеть значения параметров бурения играют огромную роль в соблюдении технологии обработки винтовых забойных двигателей. Как

бы ни была совершенна технология, невозможно вести бурение по недостоверным данным, считываемым с приборов. Так, например, зачастую стрелочный манометр удален от пульта бурильщик на 5–7 м, что затрудняет считываемость, если при этом добавить плохую работу компенсаторов, то увидеть, например, изменение давления в нагнетательной линии невозможно. Поэтому в этих условиях говорить об оперативном управлении подводимой гидравлической мощностью нецелесообразно.

2. Крутящий момент на роторе удается опередить не всегда. Так, например, при направленном бурении (бурение без вращения) этот показатель становится бесполезным.

3. По темпу изменения давления в нагнетательной линии в условиях отсутствия автоматизированной технологии управления отработкой ВЗД – регулятора подачи бурового инструмента [12], можно судить об изменении степени буримости породы, однако визуально определить темп изменения давления очень сложно. Согласно [13], например, резкие скачки давления или резкое падение перепада давления в монофольдной линии при постоянной осевой нагрузке свидетельствуют либо об изменении физико-механических свойств породы, либо о подклинках долота по различным причинам, к примеру, вследствие чрезмерного износа периферийного вооружения или потери диаметра долота и пр.

Таким образом, в процессе бурения управлять подводимой гидравлической мощностью можно, основываясь на дифференциальном перепаде давления на ВЗД – оперативная дозировка и автоматизированное управление подводимой гидравлической мощностью при разрушении горных пород в процессе бурения способны обеспечить высокую механическую и, как следствие, рейсовую скорость бурения.

Именно автоматизация технологии позволит поддерживать на ВЗД ту необходимую мощность, которая требуется для эффективного разрушения горной породы в определенный момент времени, и избавит в процессе бурения от многих ошибок – например, от ошибок, связанных с человеческим фактором.

### **Выбор режимов бурения и отработка винтового забойного двигателя по технологии применения электропорошкового тормоза**

Согласно [14] в процессе углубления скважины можно изменять определенные параметры, которые принято называть параметрами режима бурения:

1. Осевую нагрузку на долото  $G$ .

1.1. Динамическую.

1.2. Статическую.

2. Расход промывочной жидкости и параметры, характеризующее ее свойства.

3. Частоту вращения долота (или бурильной колонны – для роторного бурения).

Без прекращения процесса углубления скважины можно изменять давление на выкидке бурового насоса или в бурильной колонне и вращательный момент для работы долота или на валу забойного двигателя ( $P_n$ ,  $M_v$  и  $M_d$ ). Но  $P_n$ ,  $M_v$  и  $M_d$  не принято относить к параметрам режима бурения, хотя  $P_n$  является одним из главных и управляемых параметров, который определяет работу ВЗД и оказывает соответствующее влияние на темп углубления скважины.

На темп бурения ВЗД оказывают определяющее влияние 2 параметра:

1) гидравлическая мощность на выкидке бурового насоса;

2) мощность, переданная забой скважины.

Следовательно, наряду с расходом  $Q$  давление  $P_n = P_{max}$  определяет величину коэффициента передачи мощности на забой скважины. По количеству технологических связей  $P_n$  равнозначно разгрузке инструмента на буровом крюке, и, видимо,  $P_n$  следует отнести к параметрам режима бурения, хотя это пока не принято.

В настоящее время принято выделять 3 вида режимов:

1. Режим бурения, при котором можно получить необходимое качество пробуренной с высокой рейсовой скоростью скважины, при данной технической вооруженности буровой называется оптимальным (или рациональным).

2. При возможности замены некоторого оборудования буровой, особенно энергетического, повышают темп углубления скважины, тогда рациональный режим бурения называют скоростным.

3. Другие названия режимов бурения («силовой», «форсированный», «режим максимальной проходки на долото» и др.) в настоящее время практически не применяют в связи с тем, что режим бурения всегда должен быть рациональным, т.е. экономически выгодным.

Также в [14] приводятся методы проектирования режимов бурения:

1) статистический, который проектируется по промысловым данным с применением методов и алгоритмов статистики при ручной обработке или чаще с использованием вычислительной техники;

2) аналитический;

3) метод пересчета.

Используя соответствующий объем промысловой информации и применяя разные методы проектирования, можно спроектировать режим бурения скважины на инженерно-научном уровне. Основным вопросом применения расчётных режимов бурения на практике можно считать использование автоматизированной технологии управления процессом бурения.

### **Совершенствование технологии управления винтовыми забойными двигателями**

Таким образом, резюмируя общие проблемы технологии бурения скважин с применением ВЗД, представим некоторые достижения и решения в отечественной практике.

При выявлении ошибок определения осевой нагрузки на долото в процессе углубления скважины известны теоретические и практические предложения отечественных ученых. К примеру, в [6], зная осевую нагрузку по станции геологических исследований (ГТИ)  $G_{ос.ГТИ}$ , рассчитанную только по изменению (потери) веса на крюке буровой установки по показателям гидравлического индикатора веса (ГИВ), автор определяет фактическую  $G_{ос}$  на долото в режиме «ротатор + ВЗД»:

$$G_{факт} = G_{ос.ГТИ} - \left( \frac{4(M_{р.р} - M_{р.х})V_n}{\omega_{скв} D_{скв}^2} \right), \quad (4)$$

где  $G_{ос.ГТИ}$  – осевая нагрузка на долото по станции ГТИ, Н;  $M_{р.р}$  – момент на роторе в рабочем режиме работы ВЗД, Нм;  $M_{р.х}$  – момент на роторе в режиме работы ВЗД на холостом ходу, Нм;  $V_n$  – скорость перемещения бурильной колонны вдоль стенки скважины;  $\omega_{скв}$  – угловая скорость вращения бурильной колонны относительно стенки скважины;  $D_{скв}$  – диаметр скважины, м. В результате исследований ошибка определения осевой нагрузки по станции ГТИ составляет 26 %.

Еще в начале 80-х гг. прошлого столетия во ВНИИБТ и его Пермском филиале авторским коллективом ученых (Д.Ф. Балденко, Т.Н. Бикчурин, Ю.В. Вадецкий, М.Т. Гусман, В.А. Каплун, В.И. Молодило и др., а позже и А.В. Вервекин), были предложены иные способы контроля режима работы винтовых забойных двигателей, которые базировались на контроле давления  $P$ . В работах [8, 11, 15, 18] и диссертационной работе А.В. Вервекина определены направления изучения, индикаторы и элементы управления технологией бурения скважин с применением современных ВЗД. Усовершенствована базовая технология бурения забойными двигателями. Основные нововведения включают: эксплуатацию оборудования по эффективному дифференциальному перепаду давления на винтовом забойном двигателе; адаптацию технологии отработки винтовых забойных двигателей к различным условиям бурения; возможности оперативного управления технологией отработки винтовых забойных двигателей. Под дифференциальным перепадом давления на винтовом забойном двигателе подразумевается разность между давлениями на стояке при рабочем  $P_p$  и холостом  $P_{х.х}$  режимах винтового забойного двигателя. Если известны основные элементы-индикаторы забойной ситуации, процесс строительства скважины становится прогнозируемым, понятным и управляемым [1, 19, 20].

Предложенные направления при усовершенствовании технологии были реализованы

## Сравнение системных элементов оперативного управления технологией отработки ВЗД

Технологии управления	Элементы технологии									
	Проектирование	Управление			Индикаторы					
	Режимы отработки ВЗД	$G_{ос}$ , т	$Q$ , л/с	$P_{диф}$ , МПа	Характер изменения $P_p$ (скорость изменения $P_p$ ), МПа			Темп подачи бурового инструмента, м/ч		
					$= f(\dots), Q = const$					
				свойства горной породы	тип долота (моментаемкость)	гидравлическая $N$ ВЗД	субъективный фактор	автоматизированные системы	индикаторы характера изменения $P_p$	
Традиционная	–	+	+	–	–			–		
Новая	+	+	+	+	+			+		

Примечание:  $Q$  – расход буровой жидкости, л/с;  $N$  – гидравлическая мощность ВЗД, кВт;  $G_{ос}$  – осевая нагрузка, т.

в алгоритме работы регулятора подачи долота (РПД) ИМ2440М (совместная разработка А.В. Вервекина, ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент» и ООО НПП «ИНТРОМАГ»). РПД позволил скорректировать, а главное реализовать следующие технологические особенности:

- постоянную времени усреднения мгновенных значений давления;
- значения рабочего давления;
- величины воздействия постоянной времени на исполнительный механизм;
- отклик автоматизированной системы управления ВЗД на темп изменения давления в нагнетательной линии.

В результате проведенных практических и теоретических исследований эксплуатационных особенностей применения ВЗД модель оперативного управления технологией строительства скважины можно представить в виде свода наиболее важных элементов, влияющих на управление процессом строительства [6, 7].

В таблице приведены характерные системные элементы управления эффективной технологией отработки ВЗД в сравнении с существующей практикой управления технологией углубления.

Предложенная модель управления технологией учитывает системно-аналитический подход с четким выделением подсистем и систем, в которых эффективно и полно реализуется подведенная к ним гидравлическая энергия с учетом систем, в которые она передается.

Нерассмотренными остались характер изменения рабочего давления в различных условиях

(горные породы с разными физико-механическими свойствами, нестандартные буровые растворы (очистные агенты, в том числе азрированные растворы [21, 22]), и др.) и разные технико-технологические способы бурения [23–27].

Из таблицы следует:

$$K_{ЭГМ} (\text{традиционная технология}) < K_{ЭГМ} (\text{новая технология}),$$

где  $K_{ЭГМ}$  – коэффициент эффективности подведения гидравлической мощности к забою (необходимой для эффективного разрушения горной породы), %.

Также не решен вопрос формализации технологических методик эффективной отработки ВЗД.

### Выводы

Вопрос контроля эффективной технологии углубления скважины по элементам оперативного управления до сих пор остается дискуссионным. Авторы сформулировали проблемы поиска оптимальных режимов бурения винтовыми забойными двигателями в условиях неограниченного изменения физико-механических свойств пород в процессе углубления скважин. Практическая реализация эффективной технологии углубления скважин предполагает решение следующих задач:

1. Изложенные нетрадиционные решения указанных проблем довести до формализованных методик выбора оптимальных элементов, параметров и индикаторов режима бурения на основе математического моделирования процесса углубления скважины и прогнозирования результатов.

2. Теоретические результаты подтвердить промысловыми испытаниями технологии и оценить приведенный новый критерий оценки эффективности способа углубления скважины с учетом различных условий и способов углубления скважин (сложный профиль скважины, нестандартные буровые растворы,

различные типы ВЗД, бурение на обсадных трубах и др.).

3. Подготовить обоснования и внести в техническую нормативную документацию, например, в ведомственные строительные нормы 39–86 от 01.01.1987 г., элемент управления технологией – дифференциальный перепад давления на ВЗД.

### Список литературы

1. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование / под общ. ред. А.М. Гусмана, К.П. Порожского. – Екатеринбург: Изд-во УГГТА, 2002. – 592 с.

2. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин: учеб. пособие для вузов. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. – 632 с.

3. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1986. – 272 с.

4. Практическое руководство по технологии бурения скважин на жидкие и газообразные полезные ископаемые / А.Г. Калинин, А.З. Левицкий, А.Г. Мессер, Н.В. Соловьев. – М.: Недра, 2001. – 450 с.

5. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород / М.Г. Абрамсон, Б.В. Байдюк, В.С. Зарецкий [и др.]. – М.: Недра, 1984. – 206 с.

6. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. Фактор дифференциального давления винтовых забойных двигателей при мониторинге режима бурения скважин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 98–101.

7. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Бичурин Т.Н. Особенности технологии бурения винтовыми забойными двигателями // Тр. ин-та ВНИИБТ. – 2011. – № 3 (71). – С. 95–105.

8. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Гноевых А.Н. Одновинтовые гидравлические машины. Т. 2. Винтовые забойные двигатели. – М.: ИРЦ Газпром, 2007. – 470 с.

9. Буровое оборудование: справочник: в 2 т. Т. 2: Буровой инструмент / В.Ф. Абубакиров, Ю.Г. Буримов, А.Н. Гноевых, А.О. Межлумов, В.Ю. Близиюков. – М.: Недра, 2003. – 494 с.

10. Калинин А.Г., Левицкий А.З., Никитин Б.А. Технология бурения разведочных скважин на нефть и газ: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1998. – 438 с.

11. Вервекин А.В., Плотников В.М., Молодило В.И. Управление подводимой гидравлической энергией при разрушении горных пород в процессе бурения // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 32–34.

12. Молодило В.И., Литвинов И.Н. Регулятор подачи бурового инструмента: пат. № 2013531, МПК E21B44/00; заявл. 15.07.1991; опубл. 30.05.1994.

13. Вервекин А.В., Плотников В.М., Молодило В.И. О повышении эффективности бурения нефтяных и газовых скважин гидравлическими забойными двигателями // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2013. – № 1. – С. 16–19.

14. Овчинников В.П., Грачев С.И., Фролов А.А. Справочник бурового мастера: учеб.-практ. пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2006. – Т. II. – 608 с.

15. Двойников М.В. Определение фактической осевой нагрузки на долото при бурении скважин с горизонтальным окончанием // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2009. – № 2. – С. 19–27.

16. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д., Шмидт А.П. Анализ характеристик винтовых забойных двигателей с целью оптимального управления процессом бурения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 1995. – № 1–2.

17. Вервекин А.В. К вопросу автоматизации процесса бурения нефтяных и газовых скважин винтовыми забойными двигателями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 10. – С. 49–65. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.10.5.

18. Молодило В.И. Способ контроля режима работы винтового двигателя в забойных условиях: а.с. № 1653390; заявл. 12.01.1989; опубл. 07.09.1993. – Бюл. № 33.

19. Буровые комплексы / под общ. ред. К.П. Порожского. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2013. – 768 с.



20. Балденко Д.Ф., Коротаев Ю.А. Современное состояние и перспективы развития отечественных винтовых забойных двигателей // Бурение и нефть. – 2012. – № 3. – С. 3–7.

21. Яковлев А.А., Турицына М.В., Могильников Е.В. Анализ и обоснование выбора очистных агентов и технология их применения при бурении скважин в условиях многолетнемерзлых пород // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 12. – С. 22–32. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.3.

22. Яковлев А.А., Турицына М.В., Кузнецов А.С. Исследование влияния различных реагентов на разрушение пен и предупреждение пенообразования у буровых растворов // Вестник Пермского национального исследовательского политехниче-

ского университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 48–55. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.6.

23. Cooper G. Directional drilling // Scientific American. – 1994. – Vol. 270, № 5. – P. 82–87. DOI: 10.1038/scientificamerican0594-82.

24. Lyons C. Working guide to drilling equipment and operations. – Houston: Gulf Publishing, 2010. – P. 617.

25. Nelik L., Brennan J. Progressing cavity pumps and mudmotors. – Houston: Gulf Publishing Company, 2005. – 214 p.

26. Tiraspol'sky W. Hydraulic downhole drilling motors. – Paris: Editions Technip, 1985. – 568 p.

27. Ruszka J. Integrating a high speed rotary steerable system with a high power drilling motor // World Oil. – 2005. – 226 (4). – P. 31–36.

## References

1. Gusman A.M., Porozhskii K.P. (Ed.) Burovye komplekсы. Sovremennye tekhnologii i oborudovanie [Drilling systems. Modern technologies and equipment]. Ekaterinburg: UGGGA, 2002. 592 p.

2. Basarygin Iu.M., Bulatov A.I., Proselkov Iu.M. Burenii neftian'nykh i gazovykh skvazhin [Drilling of oil and gas wells]: uchebnoe posobie dlia vuzov. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2002. 632 p.

3. Spivak A.I., Popov A.N. Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin [Rock destruction during drilling]. Moscow: Nedra, 1986. 272 p.

4. Kalinin A.G., Levitskii A.Z., Messer A.G., Solov'ev N.V. Prakticheskoe rukovodstvo po tekhnologii burenii skvazhin na zhidkie i gazoobraznye poleznye iskopaemye [Practical Guide on drilling technology for liquid and gas mineral resources]. Moscow: Nedra, 2001. 450 p.

5. Abramson M.G., Baidiuk B.V., Zaretskii V.S. et al. Spravochnik po mekhanicheskim i abrazivnym svoistvam gornykh porod [Handbook of mechanical and abrasive properties of rocks]. Moscow: Nedra, 1984. 206 p.

6. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Faktor differentsial'nogo davleniia vintovykh zaboinykh dvigatelei pri monitoringe rezhima burenii skvazhin [Pressure difference monitoring at downhole screw motors operation]. *Nefyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 2014, no.3, pp.98-101.

7. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Bichkurin T.N. Osobennosti tekhnologii burenii vintovymi

zaboinymi dvigateliami [Features of technology of drilling downhole drilling motors]. *Trudy instituta VNIIBT*, 2011, no.3 (71), pp.95-105.

8. Baldenko D.F., Baldenko F.D., Gnoevykh A.N. Odnovintovye gidravlicheskie mashiny. Vol. 2. Vintovye zaboinye dvigateli [Single downhole hydraulic machine. T. 2. DDM]. Moscow: IRTs Gazprom, 2007. 470 p.

9. Abubakirov V.F., Burimov Iu.G., Gnoevykh A.N., Mezhlumov A.O., Blizniukov V.Iu. Burovoe oborudovanie [Drilling equipment]: spravochnik: v 2 tomakh. Vol. 2. Burovoi instrument [Drilling equipment]. Moscow: Nedra, 2003. 494 p.

10. Kalinin A.G., Levitskii A.Z., Nikitin B.A. Tekhnologii burenii razvedochnykh skvazhin na neft' i gaz [Exploratory drilling technology for oil and gas]: uchebnoe posobie dlia vuzov. Moscow: Nedra, 1998. 438 p.

11. Vervekin A.V., Plotnikov V.M., Molodilo V.I. Upravlenie podvodimoi gidravlicheskoii energiei pri razrushenii gornykh porod v protsesse burenii [Control of input hydraulic power at rock destruction during well drilling]. *Nefyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 2013, no.4, pp.32-34.

12. Молодило В.И., Литвинов И.Н. Регулятор подачи бурового инструмента [Mud feed regulator]: patent no. 2013531, МПК E21B44/00; zaiavlen 15.07.1991; opublikovan 30.05.1994.

13. Vervekin A.V., Plotnikov V.M., Molodilo V.I. O povyshenii effektivnosti burenii neftian'nykh i gazovykh skvazhin gidravlicheskimi zaboinymi

dvigateliami [On improving the efficiency of drilling of oil and gas wells with hydraulic downhole motors]. *Stroitel'stvo nef'tianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2013, no.1, pp.16-19.

14. Ovchinnikov V.P., Grachev S.I., Frolov A.A. Spravochnik burovogo мастера [Manual drill master]: uchebno-prakticheskoe posobie. Moscow: Infra-Inzheneriia, 2006, vol.II, 608 p.

15. Dvoynikov M.V. Opredelenie fakticheskoi osevoi nagruzki na doloto pri burenii skvazhin s gorizontalmym okonchaniem [Determining the actual weight on bit during drilling with a horizontal]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2009, no.2, pp.19-27.

16. Baldenko D.F., Baldenko F.D., Shmidt A.P. Analiz kharakteristik vintovykh zaboinykh dvigatelei s tsel'iu optimal'nogo upravleniia protsessom burenii [An analysis of the characteristics of DDM for optimal control of drilling process]. *Stroitel'stvo nef'tianykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 1995, no.1-2.

17. Vervekin A.B. K voprosu avtomatizatsii protsessa burenii nef'tianykh i gazovykh skvazhin vintovymi zaboinymi dvigateliami [To the question of automation of oil and gas wells drilling with screw downhole motors]. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no.10, pp.49-65. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.10.5.

18. Molodilo V.I. Sposob kontroliia rezhima raboty vintovogo dvigatel'ia v zaboinykh usloviiah [A method for controlling the operating mode of the downhole motor in the bottom hole conditions] avtorskoe svidetel'stvo № 1653390; zaiavleno 12.01.1989; opublikovano 07.09.1993. *Biulleten'* no.33.

19. Porozhskii K.P. (Ed.) Burovye kompleksy [Drilling systems]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UGGU, 2013. 768 p.

20. Baldenko D.F., Korotaev Iu.A. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia otechestvennykh vintovykh zaboinykh dvigatelei [Current state and prospects of development of domestic screw downhole motors]. *Burenie i neft'*, 2012, no.3, pp.3-7.

21. Iakovlev A.A., Turitsyna M.V., Mogil'nikov E.V. Analiz i obosnovanie vybora ochistnykh agentov i tekhnologii ikh primeneniia pri burenii skvazhin v usloviiah mnogoletnemerzlykh porod [Analysis and justification of selecting cleaning agents and technology of their application in permafrost well drilling]. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no.12, pp.22-32. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.3.

22. Iakovlev A.A., Turitsyna M.V., Kuznetsov A.S. Issledovanie vliianiia razlichnykh reagentov na razrushenie pen i preduprezhdenie peno-obrazovaniia u burovnykh rastvorov [Research into effects of certain reagents on foam destruction and prevention of foam-formation in drill fluids]. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no.15, pp.48-55. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.6.

23. Cooper G. Directional drilling. *Scientific American*, 1994, vol.270, no.5, pp.82-87. DOI: 10.1038/scientificamerican0594-82.

24. Lyons C. Working guide to drilling equipment and operations. Houston: Gulf Publishing, 2010. 617 p.

25. Nelik L., Brennan J. Progressing cavity pumps and mudmotors. Houston: Gulf Publishing Company, 2005. 214 p.

26. Tiraspolsky W. Hydraulic downhole drilling motors. Paris: Editions Technip, 1985. 568 p.

27. Ruzka J. Integrating a high speed rotary steerable system with a high power drilling motor. *World Oil*, 2005, 226 (4), pp.31-36.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Балденко Д.Ф., Вerveкин А.В., Плотников В.М. Пути дальнейшего совершенствования технологии бурения скважин с применением винтовых забойных двигателей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №19. – С.165–174. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.7

Please cite this article in English as:

Baldenko D.F., Vervekin A.V., Plotnikov V.M. Ways to further improvement of well drilling by downhole drilling motors. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no. 19, pp.165–174. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.7