

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 550.822.5

ПЕРСПЕКТИВЫ НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ ПРОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

А. С. Кондратенко, В. В. Тимонин, А. В. Патутин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: kondratenko@misd.nsc.ru, timonin@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Проанализированы существующие способы получения протяженных направленных скважин при бурении горных пород при разработке месторождений высоковязкой нефти и природных битумов. Предложены пути развития направленного бурения горных пород высокой прочности с применением ударно-вращательного воздействия на геоматериал в паре с навигационными системами.

Ударное вращательное бурение, гидроударник, траектория скважины, бестрашнейные технологии

В последнее время активно развиваются технологии бурения направленных скважин в горных породах различной крепости из горных выработок и с поверхности земли. Востребованность таких скважин постоянно растет в связи с применением новейших технологических решений в области добычи твердых полезных ископаемых как открытым, так и подземным способами, отработки месторождений угля и редкоземельных металлов, строительства современных объектов и т. д. [1, 2].

Все больше внимания уделяется вопросу разработки месторождений высоковязкой нефти (ВВН) и природных битумов (ПБ), поскольку основные мировые запасы углеводородов сосредоточены именно в них. По разведанным запасам тяжелой нефти Россия занимает третье место в мире после Канады и Венесуэлы. Мировые запасы ВВН и ПБ составляют более триллиона тонн [3].

Высокая вязкость тяжелых нефтей исключает эффективное применение традиционных технологий нефтедобычи и является главной предпосылкой использования тепловых методов воздействия на пласт. Единственная технология, которая может обеспечить радикальное увеличение нефтеотдачи, — паротепловое воздействие на залежь.

Термошахтная добыча тяжелых нефтей сочетает дренажную шахтную разработку с методами воздействия на пласт теплоносителями и осуществляется с помощью вскрытия продуктивного пласта горизонтальными, пологонаклонными и восстающими скважинами, пробуренными из подземных горных выработок. Нефтенасыщенная порода на поверхность земли не поднимается.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-00008).

Подземно-поверхностная система — одна из наиболее перспективных систем термошахтной разработки месторождений тяжелых нефтей и природных битумов. В ней пар закачивается через вертикальные нагнетательные скважины, пробуренные с дневной поверхности, и распределяется по продуктивному пласту с помощью парораспределительных скважин, которые пробурены из подземных выработок к забоям нагнетательных скважин. Добыча нефти производится через подземные добывающие скважины.

Вынос системы пароснабжения на поверхность позволяет повысить параметры закачиваемого пара до максимально возможных, определяемых температурой начала дистилляции нефти в пласте, что ведет к более интенсивному воздействию на пласт, а следовательно, к повышению темпов разработки месторождения.

Несмотря на высокую технологическую эффективность термошахтной добычи нефти, эта технология при действующих мировых ценах на нефть является экономически нерентабельной. Актуальной представляется разработка решений по снижению затратных статей на ее реализацию, повышению эффективности отдельных технологических операций. Это касается в первую очередь вскрытия пласта и системы подачи теплоносителя в пласт.

Применение новых технологий обработки позволяет сокращать протяженность горных выработок за счет увеличения длины подземных скважин до 1000 м с помощью буровых станков и осуществлять направленное бурение длинных пластовых скважин из выработки [4].

При создании техники направленного бурения основные сложности связаны с управлением траекторией скважины, разработкой рабочего инструмента, системой локации и навигации, размещением коммуникационного и силового кабеля внутри буровых штанг.

В строительных геотехнологиях, развивающихся во всем мире с 60-х годов прошлого века, многие перечисленные проблемы уже успешно решены и реализованы в установках горизонтально-направленного бурения (ГНБ). В основе технологии ГНБ лежит разрушение геоматериала потоком жидкости под давлением с одновременным механическим воздействием на него бурового инструмента, а управление осуществляется с помощью поворота в то или иное положение относительно оси скважины буровой лопатки (рис. 1а) [5]. Информация о пространственных координатах и текущем положении буровой лопатки передается оператору буровой установки от электромагнитного излучателя, установленного сразу за буровой лопаткой. Однако такой классический способ ГНБ не в состоянии выполнить проходку скважин в скальном массиве, поскольку буровая лопатка не может внедриться в горный массив в заданном часовом положении под действием осевой силы. При этом необходимость в сооружении бестраншейных каналов различного назначения в сложных горно-геологических условиях с каждым годом становится выше [6]. Например, при строительстве олимпийских объектов в горной местности г. Сочи было пробурено несколько тысяч метров горизонтально-направленных скважин.



Рис. 1. Буровой инструмент: а — буровая лопатка ГНБ; б — шарошка; в — буровая лопатка для ударного бурения

В настоящее время в мировой практике реализован ряд различных технических решений направленного бурения в прочных горных породах, одним из которых является механическая система бурения с двойными штангами (DITCH WITCH All Terrain и Vermeer D36x50DR) [7]. Система имеет внутреннюю штангу, отвечающую за вращательный привод буровой шарошки (рис. 1б). Управление траекторией бурения осуществляется поворотом внешней буровой колонны, первая секция которой отклонена от оси бурения на угол около 1.5° . Очистка забоя от разрушенного геоматериала обеспечивается потоком жидкости под давлением аналогично классическим системам ГНБ.

Следующее решение базируется на применении гидравлического забойного двигателя, который трансформирует энергию потока буровой жидкости в крутящий момент бурового инструмента. В этом случае колонна бурильных труб поворачивается только для изменения траектории скважины по аналогии с системой с двойными штангами. Забойные двигатели используются для бурения на нефтепромыслах с 1920-х годов. В установках ГНБ забойный двигатель применяется в качестве альтернативы типовой буровой головке (рис. 1а) и может быть установлен на любой стандартной буровой машине без конструктивных изменений. Эффективное использование забойных двигателей требует нагнетания большого количества бурового раствора, что может обеспечить не каждая установка ГНБ, а высокое давление бурового раствора может привести к разрушению скважины и выбросу буровой жидкости в окружающую среду через поверхность грунта или же в воду при бурении через водную преграду [7].

Немецкой компанией TRACTO-TECHNIK GmbH реализован способ разрушения скальных пород, в основе которого лежит комбинация классического способа ГНБ с ударными импульсами, передающимися на буровой инструмент по буровым штангам от выносного гидроударного модуля. Для более эффективного разрушения горной породы на буровой инструмент устанавливаются твердосплавные элементы (рис. 1в) [5].

Для бурения скальных пород методом ГНБ стали использовать погружные пневмоударники. Ударное бурение эффективнее, чем вращательное, если речь идет о прочных или весьма прочных горных породах. Для работы погружного пневмоударника применяют сжатый воздух высокого давления (до 3.2 МПа). Отработанный сжатый воздух идет на очистку скважины. Сложности при извлечении выбуренного материала зачастую критически снижают производительность, поскольку при сложной траектории горизонтально-ориентированной скважины неизбежно образуется подстилающий слой. Погружные пневмоударники используются как с обычным буровым оборудованием ГНБ с одинарными штангами, так и в моделях, оборудованных двойными штангами. Во всех случаях применения ударных нагрузок навигационную аппаратуру необходимо устанавливать в ударозащищенный корпус, поскольку динамическое воздействие и вибрация не только разрушают оборудование, но и приводят к искажению информации о положении бурового инструмента.

При бурении с одинарной буровой колонной управление траекторией скважины осуществляется за счет несимметричной формы буровой коронки, часть которой срезана под углом около 30° к оси скважины (рис. 2). Управление может показаться сложным, поскольку при изменении траектории бурения буровая головка не вращается, а поворачивается на неполный оборот поочередно по часовой стрелке и против. За счет этого под действием ударной нагрузки забой разрушается несимметрично и буровая коронка, упираясь в неразрушенный сегмент, изменяет направление скважины. После того как траектория скважины скорректирована, бурение продолжается с постоянным вращением буровой коронки на весь оборот и одновременным ударным воздействием. Новейшие установки ГНБ снабжены функциями автоматизации управления, которые облегчают работу оператора.



Рис. 2. Несимметричная буровая коронка с погружным пневмоударником

В случае применения двойной буровой колонны и погружного пневмоударника управление траекторией скважины осуществляется за счет соединения пневмоударника с наружной невращающейся трубой колонны под незначительным отклонением от оси по аналогии с механической системой бурения с двойными штангами.

Использование пневмоударных механизмов требует источника сжатого воздуха и устройства подачи смазки в подвижные элементы, а это во всех случаях дополнительные габаритные модули для стандартной установки ГНБ, требующие отдельного привода. Необходима также система распределения потоков сжатого воздуха для питания пневмоударника и бурового раствора для качественной очистки скважины от продуктов разрушения и укрепления стенок скважины при прохождении зоны слабых пород.

Наиболее технологичным решением проходки направленных скважин в прочных горных породах представляется использование гидроударных погружных машин на базовых установках ГНБ. Такие машины, как и погружные пневмоударники, могут быть интегрированы в любую систему управления траекторией скважины, поскольку могут работать на воде, используя ее как энергоноситель и как выносящий шлам агент.

В литературе приводится большое количество разнообразных по конструкции гидравлических ударных устройств [8]. Машины ударного действия с гидроприводом делятся на два типа: гидродинамические — если используется (преобразуется) кинетическая энергия рабочего тела (энергоносителя), и объемного типа — если используется (преобразуется) потенциальная энергия давления энергоносителя. В настоящее время погружные гидравлические ударные машины, распространенные во всем мире, являются гидродинамическими. Конструктивно они более просты, но имеют низкий КПД (не выше 20 % против 40–60 % для объемных) и значительный расход жидкости (до 1 000 л/мин [9]), что не всегда приемлемо при ведении работ.

Погружные гидрообъемные машины обладают более высокими энергетическими показателями и технологическими возможностями. При этом машины универсальны по энергоносителю, работают на воде или полимерно-бentonитовых растворах, обеспечивая не только высокую энергию удара, но и эффективную очистку скважины, крепление и поддержание стенок скважины в неустойчивых зонах.

В лаборатории бурения ИГД СО РАН разработан, изготовлен и испытан в стендовых условиях экспериментальный образец погружного гидроударника объемного типа в базовом типоразмере 76 мм [10–13].

На рис. 3 приведено конструктивное исполнение погружного гидроударника объемного типа со встроенным пружинным аккумулятором с обратной связью с призабойным пространством. Особенностью конструкции является распределительная система питания – разрядки

управляемой камеры рабочего хода ударника, включающая дифференциальный питающе-разрядный клапан, который обеспечивает питание камеры рабочего хода на всем пути движения ударника в фазе прямого хода и принудительную разрядку (вытеснение жидкости) камеры рабочего хода в фазе обратного хода, до команды на перекидку клапана из положения “разрядка” в положение “питание”. Наличие пружинного аккумулятора с обратной связью создает условия работы пружин с постоянной нагрузкой, т. е. независимо от изменяющихся условий на забое скважины. Без такой связи никакой аккумулятор не обеспечит нормальную работу погружного гидроударника, если будут меняться условия в призабойном пространстве, например возрастание противодавления. Краткая техническая характеристика погружного гидроударника объемного типа приведена в таблице.

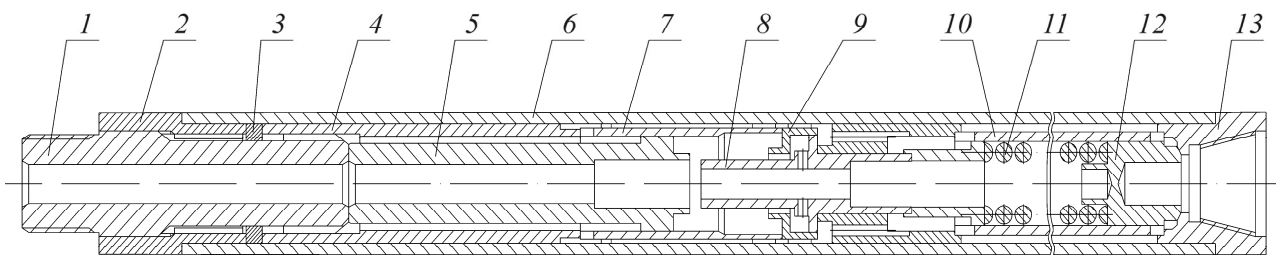


Рис. 3. Конструкция погружного гидроударника со встроенным аккумулятором: 1 — наковальня; 2 — гайка ведущая; 3 — полукольца стопорные; 4 — втулка центрирующая; 5 — ударник; 6 — корпус; 7 — гильза ударника; 8 — шток разрядный; 9 — клапан питающе-разрядный; 10 — гильза аккумулятора; 11 — пружина аккумулятора; 12 — поршень аккумулятора; 13 — переходник

В таблицу внесены данные по погружным гидроударникам отечественных и зарубежных разработок, выявленных при поиске аналогов. Приведены модели, наиболее близкие по типу-размеру, назначению и виду энергоносителя, а также известные по применению или перспективности.

Сравнительная характеристика погружных гидроударников

Показатель	Тип машины, модель, разработчик			
	гидродинамический Г 76 У (СКБ “Геотехника”)	гидродинамический YQ-150 (Nanjing, Китай)	гидродинамический G-wassara (“Wassara”, Швеция)	объемный ГУ 76 СО (ИГД СО РАН)
Наружный диаметр, мм	70	146	96	70
Расход жидкости, л/мин	190	300–450	280–450	120
Перепад давления, МПа	1.35	1.6–2.5	18.0	2.0
Энергия удара, Дж	45	150–350	~350–400	120
Частота ударов, Гц	22	10–20	~45–50	15
Удельная энергия, Дж/м ³ ·10 ³	312	450	4300	900
Коэффициент полезного действия, %	23	17–25	~20	45
Состояние разработки	Серийное	Промышленное	Промышленное	Экспериментальное

По наиболее значимым показателям разрабатываемый ИГД СО РАН базовый образец выгодно отличается от аналогов.

Для сравнения интересен гидроударник “Wassara”. Высокие показатели этой машины определяются весьма существенным расходом воды (280–450 л/мин) и высоким рабочим давлением (18 МПа) энергоносителя. Для условий бурения крепких горных пород это приемлемо и даже необходимо, а при бурении сложных разрезов с неустойчивыми зонами такой расход промывочной жидкости недопустим. Гидроударник работает только на воде с 100-микронной фильтрацией. Компания видит перспективность разработки в горном деле и отмечает выгоду ее применения по сравнению с пневмоударником на высоком давлении сжатого воздуха.

Направление разработок ИГД СО РАН ориентировано также на ударно-вращательный способ бурения, но в более широком диапазоне крепости пород и геологических условий с привязкой к конкретным технологиям: бурение сплошным забоем без отбора проб и бурение колонковыми наборами с креплением стенок скважины глинистым раствором. Расход промывочной жидкости, необходимый для эффективной работы гидрообъемной машины, находится в диапазоне 50–200 л/мин. Это позволяет использовать опцию гидроударного бурения на установках ГНБ любой мощности.

Определяющее значение в такой модернизации установки ГНБ имеют незначительные затраты на оснащение гидроударником. Вместе с тем расширяется не только диапазон геоматериала, в котором можно выполнить направленную скважину, но и область применения установок ГНБ в целом. Такие модернизированные машины могут осуществлять различные технологические операции в горном деле: анкерные скважины для укрепления бортов карьеров (рис. 4а), скважины для подачи с поверхности закладочного материала (рис. 4б), вентиляционные скважины.

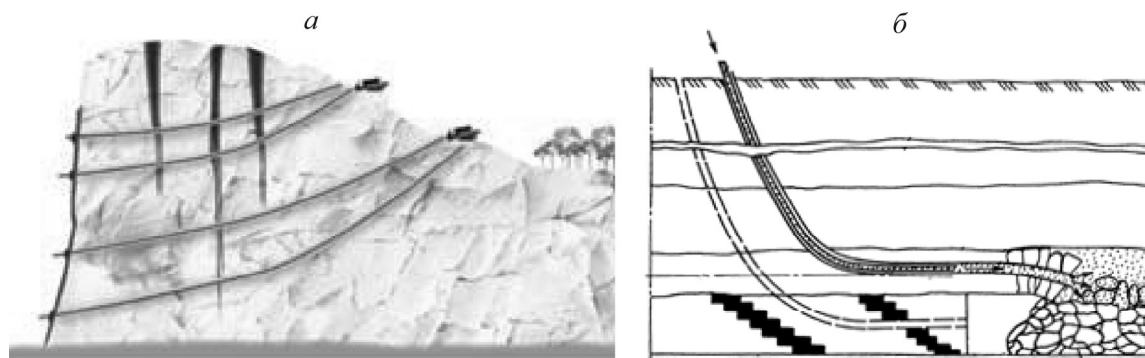


Рис. 4. Технологические скважины: а — анкерные скважины [6]; б — скважина для подачи закладочного материала

Однако для бурения направленных скважин различного назначения из горных выработок установки ГНБ непригодны в силу своих значительных габаритов, привода от ДВС и ограниченного угла захода скважины. В настоящее время серийно выпускаются установки для создания протяженных направленных скважин из подземных выработок, в основе которых лежит принцип бурения с использованием винтовых забойных двигателей. Такие машины применяются для бурения угля и пород крепостью на сжатие до 140 МПа. Максимальная протяженность скважины с использованием этой техники составляет около 1000 м. Производительность бурения 130 м в смену [14]. Помимо взрывобезопасности и стесненных габаритов рабочего пространства подземные условия накладывают ограничения и на навигационные системы контроля траектории бурения. Если при работе с поверхности информация о положении бурового инструмента передается посредством электромагнитных волн при глубине погружения до 40 м, то в подземных условиях применяются системы, фиксирующие магнитное поле Земли и ази-

мут. Следовательно, измерительный зонд должен быть установлен в немагнитном корпусе и элементы, находящиеся на расстоянии ближе 3 м к нему, должны быть изготовлены из немагнитных материалов. К таким элементам относятся буровая коронка, винтовой забойный двигатель и первая штанга. Сигнал с пространственными координатами и положением по часам бурового инструмента от зонда передается по осевому кабелю, расположенному внутри штанг, на пульт управления буровой установки.

Перспектива повышения производительности и возможность бурения пород с крепостью на сжатие более 140 МПа из подземных выработок также связаны с применением ударного воздействия на геоматериал. Для воплощения этой идеи потребуются решение ряда задач. В первую очередь ударный узел должен быть выполнен из немагнитной стали с твердостью не ниже 35–40 HRC_э. Такие материалы существуют (например, сталь 40X4Г18), однако их стоимость может составлять до 50 000 \$ за тонну. К тому же применение немагнитных элементов позволяет решить задачу высокоэффективного бурения твердых пород, но в железных рудах необходим принципиально иной принцип действия навигационной системы.

Вариантом такой системы может быть забойное измерительное устройство на базе гироскопических датчиков, применяющееся в практическом бурении нефтегазовых скважин. Основное преимущество таких приборов — измерение не магнитного, а географического азимута, а также возможность азимутальной ориентации плоскости отклонителя внутри (или вблизи) магнитных стальных элементов и железнорудном массиве. Появившиеся в последнее время миниатюрные твердотельные гироскопические датчики, выполненные по iMEMS-технологии (микромашин), позволяют на их основе создавать качественно иные забойные измерительные устройства.

В отличие от традиционных гироскопов, они более устойчивы к высоким температурам, вибрации, ударам и в условиях, когда обычные гироскопические датчики разрушаются, эти миниатюрные устройства нормально функционируют. Такие эксплуатационные параметры достигаются за счет снижения их метрологических характеристик, тем не менее даже на базе этих сравнительно “грубых” датчиков могут быть созданы забойные приборы вполне приемлемой точности. Их отличительная особенность — помехоустойчивость чувствительных элементов, миниатюрность, простая конструкция и высокая надежность, что обеспечивает возможность проведения гироскопических измерений в экстремальных забойных условиях, в частности непосредственно в процессе бурения [15]. Однако такие системы навигации не в состоянии непрерывно отслеживать положение бурового инструмента и траекторию скважины. Для получения достоверной информации необходимо остановить все процессы, провести запись текущих координат и на основании полученных данных продолжить бурение с корректировкой траектории или без нее.

ВЫВОДЫ

Совершенствование техники и технологии бурения глубоких направленных скважин различного назначения в прочных горных породах является актуальной задачей.

Использование экономичных гидроударников в качестве навесного оборудования установок ГНБ позволит расширить их область применения и не требует дополнительного источника энергоносителя.

Развитие направленного бурения из горных выработок пород высокой прочности сводится к применению ударно-вращательного воздействия на геоматериал в паре с гироскопическими навигационными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неверов С. А., Неверов А. А.** Сравнительная геомеханическая оценка вариантов выпуска руды подэтажного обрушения с ростом глубины // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
2. **Еременко А. А., Клишин В. И., Еременко В. А., Филатов А. П.** Обоснование геотехнологии освоения подкарьерных запасов трубки “Удачная” // ФТПРПИ. — 2003. — № 3.
3. **Патутин А. В., Тимонин В. В., Кондратенко А. С., Рыбалкин Л. А.** Комплексные исследования угольных пластов в глубоких скважинах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2014. — Т. 2. — № 1.
4. **Rybalkin L. A., Azarov A. V., Patutin A. V., Shilova T. V., Serdyukov S. V.** Geomechanical properties determination based on data obtained from in-seam boreholes logging, Proceedings of VietRock 2015 International Symposium, Vietnam, Hanoi, March 12–13, 2015.
5. **Рыбаков А. П.** Основы бестраншейных технологий. — М.: Пресс Бюро, 2005. — № 1.
6. **Вайер Г-Й.** Бурение прочных пород в горных условиях методом ГНБ // РОБТ. — 2011. — № 6.
7. **HDD rock drilling methods** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ditchwitch.com/articles/hdd-rock-drilling-methods> (дата обращения: 21.04.2015).
8. **Архипенко А. П., Федулов А. И.** Гидравлические ударные машины. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991.
9. **Hanjin** [Электронный ресурс]. URL: <http://hanjin-db.ru/> (дата обращения: 21.04.2015).
10. **Липин А. А., Тимонин В. В.** Погружные гидроударники объемного типа // Горн. журн. — 2006. — № 12.
11. **Липин А. А.** Перспективные пневмоударники для бурения скважин // ФТПРПИ. — 2005. — № 2.
12. **Пат. 2307911 РФ, МПК Е 21 В 4/14, Е 21 В 1/26.** Погружной гидроударник / В. В. Тимонин; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН. — № 2006114656; заявл. 28.04.2006; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 28.
13. **Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. А., Тимонин В. В., Карпов В. Н., Попелюх А. И.** Опыт создания в ИГД СО РАН погружных пневмоударников высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2014. — № 5.
14. **Войтов М. Д., Усков А. В.** Применение направленного бурения скважин для предварительной дегазации угольных пластов // Вестн. КузГТУ. — 2010. — № 3.
15. **Скобло В. З., Ропяной А. Ю., Лухт А. И.** “Гироориентатор-курс” — прибор для гироскопического ориентирования отклонителя в процессе бурения // Вестн. Ассоциации буровых подрядчиков. — 2010. — № 3.

Поступила в редакцию 9/VII 2015