

В.С.ЛИТВИНЕНКО, Б.Б.КУДРЯШОВ
Санкт-Петербургский горный институт,
Россия

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Зародившись в глубокой древности, бурение скважин до второй половины XIX в. оставалось, в основном, ударным на канате или штангах. Вращательное бурение было только ручным и применялось для проходки мелких скважин в слабосвязных породах. Еще за 600 лет до н.э. Конфуций писал о тысячах скважин глубиной до 500 м и даже до 1200 м, пробуренных в Китае на воду и соль [7]. В течение веков древнее изобретение китайцев практически не изменялось. Французские путешественники XIX в. описывали китайскую технологию бурения такой, какой она была более 2,5 тысячелетий назад.

Все основные принципы современной технологии бурения глубоких скважин и, в частности, разрушения горных пород при бурении полностью сформировались в самом конце XIX и начале XX в. и остаются неизменными по сей день. В 1886 г. швед Р.А.Крелиус начал производство буровых станков с рычажной подачей для колонкового бурения. В 1890-х годах в Германии был получен патент, а в России – царская привилегия на турбобур. В 1898 г. П.В.Валицкий предложил электробур, а в 1899 г. Дэвис в США – технологию бурения в твердых породах чугуной дробью. В том же году профессор Санкт-Петербургского горного института С.Г.Войслав создал теорию алмазного бурения и практически современную мелкоалмазную коронку. В 1901 г. В.Вольский в России разработал и испытал гидравлический «буровой таран» (гидроударник). В том же году в США на месторождении Спиндлтот впервые начато применение роторного бурения. В 1908 г. бакинский нефтепромышленник Бенкендорф изготовил и испытал на практике электробур, а в 1909 г. американский инженер Говард Юз изобрел шарошечное долото.

Дальнейшее развитие технологии и технических средств бурения глубоких скважин шло чисто эволюционным путем, оставаясь основанным на механическом разрушении горных пород – резании, скальвании, дроблении.

На рубеже XIX–XX веков Россия занимала первое место в мире по добыче нефти. В 1901 г., главным образом, в районе Баку добыто 11,5 млн т нефти (в США – 9,4 млн т) из более чем 2 тыс. скважин, но бурение еще долгое время велось ударным «галицийским» способом. В

1913 г. в России было пробурено на нефть 250 тыс. погонных метров скважин, но роторным способом с 1911 по 1920 г. – всего 36 скважин. Достаточно сказать, что и в наши дни наиболее древний способ проходки скважин – ударно-канатное бурение широко применяется при разведке россыпей, проходке взрывных скважин на карьерах, сооружении водозаборных и водопонижающих скважин, на что не повлияла даже попытка Н.С. Хрущева запретить этот способ бурения после того, как он увидел в кинохронике огневое бурение взрывных скважин на одном из криворожских карьеров.

Бурение глубоких скважин – редкая отрасль современного производства, на которой практически не сказалась научно-техническая революция XX в. [6]. В 1960-е годы президент США поставил перед специалистами задачу дать прогноз буровой технологии к началу XXI в. Их вывод о сохранении общей схемы роторного бурения и механического способа разрушения породы забоя вполне подтвердился на практике. Коренных изменений в технологии и технике бурения глубоких скважин не произошло и в ближайшее время не предвидится.

Характерен пример освоения турбинного бурения. Первый в мире воплощенный в металле редуторный турбобур М.А.Капелюшникова использовался при бурении нефтяных скважин с 1924 г., но уже через несколько лет был снят с производства, поскольку технико-экономические показатели непрерывно совершенствовавшегося обычного роторного бурения стали превышать его показатели. Передовая идея была вынуждена временно отступить. Созданный позже в СССР под руководством П.П.Шумилова современный многоступенчатый безредукторный турбобур в условиях планового хозяйства и командно-административной системы управления стал чрезмерно широко внедряться в практику буровых работ в ущерб развитию технологии и технических средств роторного бурения.

Во всем мире продолжалось эволюционное совершенствование технологии и техники глубокого бурения. Повышалось качество и надежность бурильных труб, появились новые эффективные разновидности шарошечных долот – штыревые, гидромониторные, возрастал их моторесурс (герметичные, маслonaполненные опоры и др.). Были созданы новые забойные двигатели – электробуры на трубах и грузонесущем кабеле, высокомоментный винтовой гидравлический двигатель, надежные гидро- и пневмоударники, в частности высокочастотный гидроударник для алмазного бурения. В разведочном бурении на твердые полезные ископаемые появились новые эффективные способы: бурение снарядами со съемным керноприемником, с гидротранспортом керна, пенетрационное и др. В дополнение к естественным алмазам и твердым сплавам стали применяться искусственные алмазы, синтетические сверхтвердые материалы. Широко используются новейшие конструкционные материалы: высококачественные стали, легкие сплавы, органополимеры, композиционные составы и др. Непрерывно развиваются и специализируются буровые растворы, газообразные и газожидкостные очистные агенты, тампонажные материалы, способы и средства крепления и изоляции стволов скважин. Быстро возрастает мощность, надежность и транспортабельность поверхностного оборудования. Широко внедряются механизация трудоемких операций, частичная автоматизация и решается задача полной автоматизации бурового процесса, основанного все еще на механическом разрушении горных пород.

Результатом этих эволюционных процессов является увеличение глубины и повышение скорости бурения, снижение сроков сооружения глубоких скважин, но не их стоимости, главным образом, потому, что разрушение породы забоя осталось прежним – механическим.

Глубочайшие для своего времени скважины были пробурены в США: в 1972 г. – № 1 Бейден глубиной 9159 м в бассейне Анадарко и в 1974 г. – № 1 Берта Роджерс глубиной 9583,2 м в штате Оклахома. Первая в мире скважина, преодолевшая 10-километровый рубеж, пройдена в России на Кольском полуострове в 1990 г. до рекордной глубины 12261 м. Эти глубочайшие и ряд других сверхглубоких скважин – лишь отдельные «булавочные уколы» на лице Земли. Практически освоенной глубиной бурения разведочных и эксплуатационных скважин в настоящее время можно считать 6000–6500 м, что составляет 0,001 или 0,1 % радиуса Земли (6370 км). На этом базируется известная формулировка: «Мы знаем нашу Землю на толщину яблочной кожуры».

Если за освоенную глубину бурения скважин в самом начале XX в. принять 1500 м, то средний за столетие прирост глубин бурения производственных скважин составит ~50 м/год, а прирост проходки сверхглубоких скважин – порядка 100 м/год.

К настоящему времени бурение глубоких скважин превратилось в важнейшую отрасль деятельности. Это первое звено в цепи материального производства. Чрезвычайная важность развития технологии и техники глубокого бурения определяется не только необходимостью разведки и разработки все более глубоко залегающих месторождений полезных ископаемых, изучения строения Земли, но и тем важнейшим фактом, что работа человека под землей на рубеже XXI в. – анахронизм, пережиток тяжелого прошлого. Убыстряющимися темпами развиваются геотехнологические методы добычи не только жидких и газообразных, но и твердых полезных ископаемых, глубинного тепла Земли с помощью систем скважин (выщелачивание солей, выплавление серы, гидродобыча фосфоритов, подземная газификация угля и др.).

Во всех промышленных странах мира развитию буровой технологии уделяется самое пристальное внимание со стороны как промышленно-финансовых групп, так и государства. Например, в бывшем СССР в 1989 г. только по системе Министерства геологии было пробурено более 25 млн м скважин. Из общего финансирования Мингео СССР до 1/4 средств расходовалось на развитие технологии и производство буровых работ.

Все новейшие достижения в области науки и техники (атомный реактор, лазер, ЭВМ, плазма, синтетические и композиционные материалы, методы обработки с применением ВЧ-, СВЧ-электромагнитных и других физических полей) либо сразу же используются при бурении скважин, либо немедленно подвергаются изучению с позиций возможного применения, прежде всего, для разрушения горных пород. Многочисленными научно-исследовательскими и производственными организациями, богатыми буровыми фирмами, университетами и научными центрами промышленно развитых стран (особенно начиная с 1960-х годов) в лабораторных и стендовых условиях ведутся исследования и разработки множества нетрадиционных методов и средств разрушения горных пород применительно к бурению скважин. Это наглядно отражают классификации способов разрушения горных пород при бурении скважин, предложенные Ю.Я.Эстриным [6] еще в 1978 г. (рис.1) и Б.И.Воздвиженским и Б.М.Ребриком [3] в 1989 г. (рис.2).

К новым способам разрушения можно отнести: гидромеханическое, гидроструйное, эрозионное, взрывное, ударными волнами, кавитационное, электрогидравлическое, электроискровое, электропробоем, ВЧ- и СВЧ-полями, ультразвуковое, электронным пучком, огнеструйное, плазменное, лазерное, контактным плавлением и др., есть и химические способы разрушения — выщелачивание, применение плавиковой кислоты и др. [1,3,4,6,9].

Однако ни один из упомянутых новых методов разрушения породы до настоящего времени не нашел практического применения при бурении глубоких скважин. Примерно та же ситуация, за исключением применения взрывных работ, имеет место при проходке горных выработок. Дело в том, что при современном глубоком бурении на собственно разрушение породы забоя затрачивается менее 1 % установочной мощности, остальная – на вращение многокилометровой бурильной колонны, на привод насосов (особенно при турбинном бурении) и на спускоподъемные операции. Взрывное разрушение крепких горных пород многократно эффективнее чисто механического, но в условиях бурения скважин невозможно организовать аналогичную проходке горных выработок циклическую смену операций обуривания, зарядания шпуров, взрывания и очистки забоя. Взрывание зарядов на поверхности забоя несравнимо менее результативно, чем в массиве, и влечет за собой неконтролируемое разрушение стенок скважины (и керна в случае необходимости его отбора). Многочисленные попытки реализации взрывного способа проходки скважин (применение микроснарядов, льющихся, двухкомпонентных ВВ) к успеху не привели. Другой пример. При разработке россыпей и других месторождений в зоне многолетней мерзлоты горняки уже успешно применяют ее высокочастотный нагрев. На эту тему в нашем институте в 1999 г. О.Б.Шонин успешно защитил докторскую диссертацию [5]. А что делаем мы, буровики? Наоборот, применяем продувку холодным воздухом или промывку пеной, чтобы сохранить естественное геокриологическое состояние мерзлых пород, обеспечить устойчивость ствола скважины и сохранность керна [8].

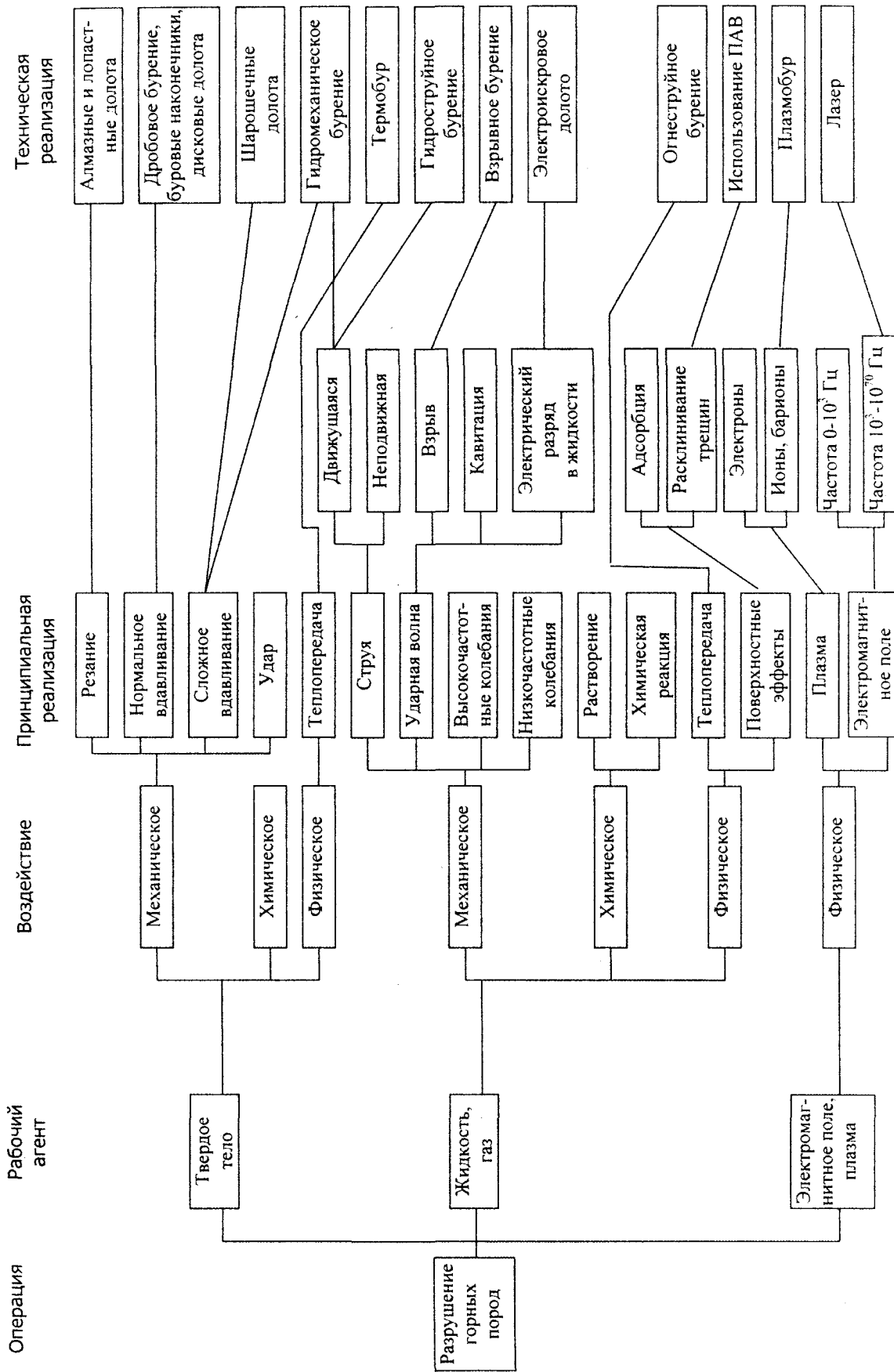


Рис. 1. Классификация способов разрушения горных пород при бурении скважин по Ю.Я.Эстрину (1978)

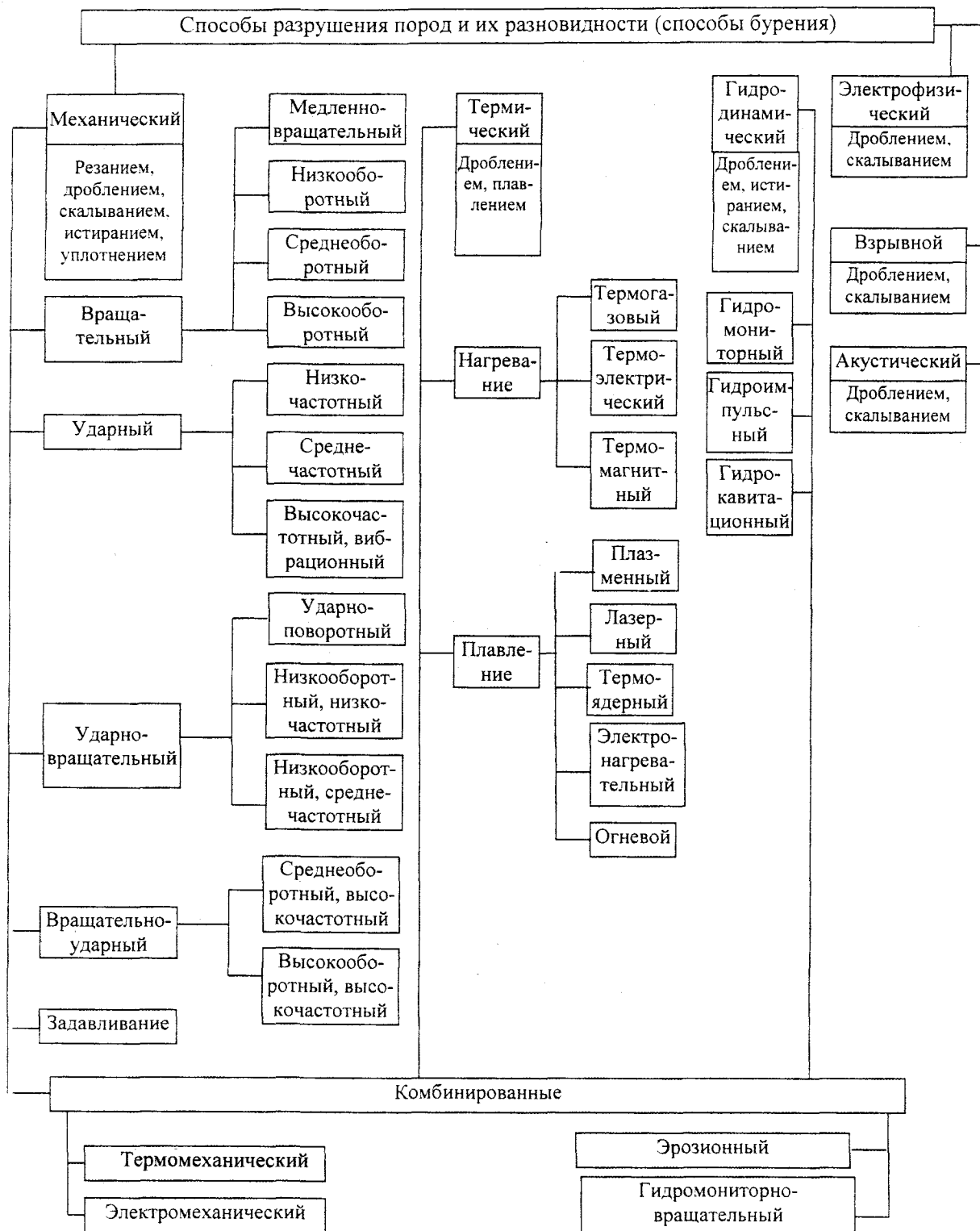


Рис.2. Классификация способов разрушения горных пород при бурении скважин по Б.И.Воздвиженскому и Б.М.Ребрику (1989)

Сам смысл глубокого бурения заключается либо в получении образцов пород (кернов) при поисках и разведке, либо в создании канала при эксплуатации месторождений жидких или газообразных полезных ископаемых, добыче глубинного тепла Земли, реализации геотехнологических методов, но во всех случаях на первый план выступает задача создания надежного, длительно устойчивого ствола скважины, исключающего потери циркуляции и водонефтегазопроявления. С увеличением глубин бурения эта задача существенно осложняется по мере роста горного и гидростатического давлений, плотности промывочной жидкости, трудно контролируемого взаимодействия ствола с окружающим горным массивом. Обеспечение устойчивости стенок скважины приобретает особо важное значение в современных условиях быстрого распространения наклонно направленного бурения, когда отклонения забоя от вертикали и протяженность наклонных и горизонтальных участков достигают тысяч метров.

Введем понятие пространственного показателя скважины k_n как отношения ее среднего диаметра к протяженности ствола. Если при среднем диаметре глубоких скважин $7\frac{7}{8}$ " (200 мм) в начале XX века $k_n = \sim 1,3 \cdot 10^{-4}$, то в настоящее время $k_n = 3 \cdot 10^{-5}$, а для сверхглубоких скважин $k_n = \sim 1,5 \cdot 10^{-5}$, т.е. практически снизился на порядок. С уменьшением этого показателя усложняется проблема размещения и доставки к забою специального оборудования для реализации новых физических методов разрушения (например, гидромультпликатора для создания импульсных струй, электронной пушки, лазерной установки и т.п.).

К настоящему времени энерговооруженность, работоспособность и износостойкость породоразрушающего инструмента для механического вращательного и ударно-вращательного бурения достигли своего предела в связи с ограниченной твердостью и прочностью истирающих и конструкционных материалов [1,2,4]. Повышение скоростей бурения в последние десятилетия достигалось за счет интенсификации процесса, использования форсированных его режимов. Это направление, как и все новые способы разрушения горных пород, сводится к повышению реализуемой на забое энергии, что в конечном счете выражается в форме теплоты. Редким примером применения новых способов в наши дни является успешное внедрение в практику термомеханического колонкового бурения с помощью разработанной во Всероссийском НИИ методики и техники разведки (ВИТР) специальной буровой коронки, сочетающей тепловое разупрочнение породы с механическим воздействием твердосплавных резцов [1,2]. Достижимые при этом механические скорости бурения в породах высоких категорий по буримости соизмеримы со скоростями алмазного бурения, а в породах средних категорий по буримости – в 3-4 раза превышают показатели твердосплавного бурения. На эту тему в нашем институте в 2000 г. Г.С.Бродовым успешно защищена докторская диссертация [2].

Рассмотрим отношение площади забоя современной глубокой (сверхглубокой) скважины к боковой поверхности ее ствола протяженностью L и средним диаметром D при диаметре забоя, в порядке первого приближения, $D_3 = D/2$:

$$\frac{\pi D_3^2}{4\pi DL} = \frac{D}{16L} = \frac{k_n}{16}.$$

В зависимости от конструкции глубокой скважины рассматриваемое отношение в 10-20 раз меньше пространственного показателя скважины k_n и составляет 1-3 миллионные доли. Создается ложное впечатление, что при бурении глубокой скважины забоя практически нет. Это и является коренной причиной столь длительного сохранения традиционного механического способа разрушения породы при бурении скважин. Действительно, при глубоком бурении проблема не в забое, а в создании и длительном сохранении устойчивого многокилометрового ствола и в затратах времени на спускоподъемные операции.

В начале 1960-х годов в связи с проектом сверхглубокого бурения группой проф. И.А.Уткина установлено, что при сохранении обычной схемы роторного бурения для достижения глубины 25 км потребуется 40 лет. Затраты времени связаны, главным образом, со спускоподъемными операциями.

Из всего многообразия новых физических способов разрушения горных пород при бурении скважин, на наш взгляд, наиболее перспективным является способ контактного плавления. На этом принципе основаны разработанные в СПГИ (ТУ) термоэлектробуровые снаряды на грузонесущем кабеле, с помощью которых во льдах Антарктиды и островов Северного Ледовитого океана пробурено более 18 тыс. м скважин. Это уже не лабораторные и стендовые эксперименты, а реальное бурение в научных целях, причем в самых суровых на Земле природных условиях [4,8]. Глубина скважин, пройденных плавлением льда на внутриконтинентальной станции Восток (Южный геомагнитный полюс и Полюс холода Земли), превышает 2700 м, средний выход керна 99,5 %. Результаты бурения плавлением дважды отмечены в Книге рекордов Гиннеса. Комплексные международные исследования скважин и ледяного керна позволили сделать ряд важных для естествознания выводов.

Дальнейшее по глубине бурение в центральной части Антарктиды мы ведем разработанным в СПГИ (ТУ) колонковым электромеханическим снарядом на кабеле, поскольку нам предстоит проникнуть в подстилающие ледник горные породы. Характерно, что скорость механического бурения льда этим снарядом может превышать 50 м/ч, но мы сознательно сокращаем скорость до 10 м/ч ради надежности процесса. Более того, у нас разработаны высокоскоростные тепловые жидкостной и высокочастотный снаряды, но мы не используем их, поскольку не в скорости бурения дело, а в продолжительности спускоподъемных операций. С помощью электромеханического снаряда на кабеле мы достигли на станции Восток рекордной глубины – 3623 м, что почти на 600 м превышает достижения американских и объединенных европейских специалистов в несравнимо более благоприятных условиях Гренландии.

Логическим продолжением этих разработок явились исследования СПГИ (ТУ), в частности, совместные с Лос-Аламосской национальной лабораторией Калифорнийского университета США, в области бурения горных пород плавлением. В стендовых условиях доказана принципиальная возможность бурения этим способом, в отличие, например, от огнеструйного, в любых горных породах, в частности в карбонатных, глиносодержащих влагонасыщенных и мерзлых. На путях конверсии российской оборонной промышленности изыскан новый композиционный жаропрочный материал на основе углерода и кремния, не требующий применения инертного газа для предупреждения окисления теплового источника электросопротивления при высоких температурах (2800 К). На учебном буровом полигоне под Санкт-Петербургом высокотемпературным пенетратором уплотняющего действия пробурены первые в Европе скважины в рыхлых четвертичных отложениях с одновременным беструбным креплением за счет термических преобразований проходимых пород.

Главным преимуществом способа контактного плавления, принципиально отличающим его от всех других новых физических и химических способов разрушения горных пород, является одновременное с бурением надежное и экологически чистое крепление стенок скважины. При бурении уплотняющим высокотемпературным пенетратором в рыхлых, слабосвязных, пористых породах происходит автомоделный процесс отторжения гравитационной воды, уплотнение, высушивание, дегидратация, разложение карбонатов с выделением CO_2 , выгорание органики, возгонка летучих, спекание, обжиг и частичное оплавление стенок за счет легкоплавких компонентов, что обеспечивает надежное беструбное крепление. При бурении в трещиноватых, раздробленных скальных породах возможно залечивание трещин и крепление застывшим, остеклованным расплавом, но технологически проще обеспечить беструбное крепление и изоляцию осложненных интервалов скважин с применением легкоплавких связующих материалов [4].

Бурение плавлением не требует вращения бурильной колонны, вместо нее возможно применение грузонесущего кабеля или шлангокабеля, за счет чего многократно снижаются затраты времени на спускоподъемные операции, упрощается автоматическое регулирование процесса бурения и дистанционное управление трассой скважины. Отсутствие экранирующего действия стальных обсадных труб повышает результативность геофизических исследований. С увеличением глубины бурения и, соответственно, естественной температуры проходимых пород преимущества способа возрастают.

Реализация потенциальных преимуществ способа бурения плавлением горных пород, сочетающего в одном процессе разрушение и созидание, требует целенаправленных исследований и опытно-конструкторских разработок при значительных капиталовложениях. По экономическим оценкам германско-швейцарского проекта Litho-Jet, основанного на плавлении породы водородно-кислородной горелкой, любые затраты быстро окупятся за счет упрощения задачи извлечения глубинного тепла Земли как альтернативного источника энергии [9]. Краткое по времени и технологически надежное сооружение сверхглубоких геотермальных скважин равносильно решению проблемы термоядерной реакции синтеза, поскольку в любой точке земного шара возможно получить практически неисчерпаемый источник тепловой, а значит, и электрической энергии, что будет означать, высокопарно говоря, «скачок человечества из царства необходимости в царство свободы».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев И.С.* Прогрессивные способы разрушения горных пород при бурении скважин / И.С.Афанасьев, Г.С.Бродов // Разведка и охрана недр. 1997. № 2. С. 24-26.
2. *Бродов Г.С.* Научно-практические основы термомеханического колонкового бурения: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 2000. 39 с.
3. *Воздвиженский Б.И.* В глубь Земли. Разведочное бурение – от прошлого к будущему / Б.И.Воздвиженский, Б.М.Ребрик. М.: Недра, 1989. 168 с.
4. *Кудряшов Б.Б.* Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород / Б.Б.Кудряшов, В.К.Чистяков, В.С.Литвиненко. Л.: Недра, 1991. 295 с.
5. *Шонин О.Б.* Физико-техническое обоснование электромагнитного разупрочнения мерзлых горных пород: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1999. 42 с.
6. *Эстрин Ю.Я.* Новые способы разрушения горных пород. – Серия «Бурение». М.: ВНИИОЭНГ, 1978. 67 с.
7. *Яковлев А.М.* Из истории бурения скважин / А.М.Яковлев, Е.Ю.Цыгельнюк, Ю.Т.Морозов // Из истории горно-геологической службы России / ВНИИ методики и техники разведки. СПб, 2000. С. 49-61.
8. *Kudryashov V.B.* Drilling in the Permafrost / V.B.Kudryashov, A.M.Yakovlev. New Delhi – India: Oxonion Press, 1990. 282 p.
9. Litho-Jet heat drilling process. Memorandum Technologies Transfer Est. 1991.