



УДК 622.24

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ



### MODERN PROBLEMS OF DEEP DRILLING

#### **Бабаян Эдуард Вартанович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
доцент кафедры нефтегазового дела,  
Кубанский государственный  
технологический университет, ИНГиЭ  
bev37@mail.ru

#### **Сидоров Руслан Валерьевич**

студент,  
Кубанский государственный  
технологический университет, ИНГиЭ  
pg87@bk.ru

#### **Усов Сергей Васильевич**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
доцент кафедры нефтегазового дела,  
Кубанский государственный  
технологический университет, ИНГиЭ  
baku50@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена обзору современных проблем глубокого бурения. На примере бурения Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) рассмотрены актуальные проблемы технологии и техники глубокого бурения.

**Ключевые слова:** бурильные трубы, скважина, забойный двигатель, предотвращение осыпей, буровой раствор.

#### **Babayan Eduard Vartanovich**

Senior Researcher,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor Departments  
of oil and gas business,  
Kuban State Technological University, INGIE  
bev37@mail.ru

#### **Sidorov Ruslan Valerevich**

Student, department of oil and gas business,  
Kuban State Technological University, INGIE  
pg87@bk.ru

#### **Usov Sergey Vasilievich**

Senior Researcher,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor Departments  
of oil and gas business,  
Kuban State Technological University, INGIE  
baku50@mail.ru

**Annotation.** This article is devoted to a review of current problems of deep drilling.

**Keywords:** drill pipes, borehole, downhole motor, prevention of scree, drilling mud.

**В** 1970–80 гг. прошлого столетия в нашей стране было заложено несколько сверхглубоких скважин. Предполагалось бурить на «Мантию». До «мантии» не добурили, но достигли значительных глубин.

Идея пробурить верхнюю оболочку Земли возникла в 60-х г.г. XX века и подразумевала пройти скважиной всю земную кору и получить образцы пород верхней мантии. Представление о мантии строится лишь по косвенным данным, а именно, по скорости распространения сейсмических волн в недрах, изменения которой интерпретируется как граница слоев горных пород разного возраста и состава.

Проект «Молох» – программа сверхглубокого бурения появилась в 1958 г. в США. Названия проекта происходит со слов «Мохоровичича» – это фамилия хорватского ученого, который выделил поверхность раздела между земной корой и мантией.

Программой предусматривалось бурить скважины в океане, так как по данным геофизиков, земная кора в океане значительно тоньше, чем на материках.

В апреле 1961 г. у Острова Гваделупа в Карибском море, где водная толща достигает 3,5 км, пробурили 5 скважин, самая глубокая из них углубилась в дно только на 189 м. Предполагалось под осадочными породами вскрыть верхний слой земной коры – граниты, но поднятый керн представлял чистые базальты.

Вторая фаза проекта «Молох» трансформировалась в проект глубокого научного бурения, в котором участвовал СССР.

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) была запроектирована в середине 60-х г.г. Находится в Мурманской области, в 10 км к западу от города Заполярного. СГ-3 была пробурена исключительно для исследования литосферы в том месте, как предполагалось, граница Мохоровичича проходит близко к поверхности земли.

Разрез Кольской скважины опроверг двухслойную модель земной коры. Базальт, поднятый с 12-и километровой глубины тут же становился гранитом, но керн крошился и распадался.

Концепция бурения СГ-3 была построена на трех основных принципах [1]:

- бурение опережающим стволом диаметром 214 мм со 100 % отбором керна;
- применением гидравлических забойных двигателей;
- применением алюминиевых бурильных труб.



Алюминиевые бурильные трубы (ЛБТ) были разработаны компанией «ВНИИТНефть» в Самаре, построены цеха на Самарском и Каменск-Уральском металлургических заводах. Инструмент для отбора керна, который просто не существовал для ожидаемых условий бурения, разрабатывался во ВНИИБТ. Пермский филиал ВНИИБТ разработал термостойкие высокопроизводительные редукторные турбобуры типа ТРМ. Была освоена технология спуска 245 мм обсадной колонны на рекордную глубину 8870 м. Цементирование осуществлялось специальными тампонажными цементами компании «ВНИИКРнефть».

Кольская скважина была запроектирована на глубину 15000 м. Фактическая достигнутая глубина 12262 м. Возможности буровой установки и бурового инструмента были практически исчерпаны, но на продолжение работ сказалась обстановка в стране и ее финансовые возможности. Но все затраты на бурение научной скважины СГ-3 с лихвой окупались (прямых расчетов не проводилось). Взять только в расчет массовое использование алюминиевых бурильных труб, что обеспечило использование более легких буровых установок в условиях Западной Сибири, а также снижение затрат на транспортировку труб.

Скважина СГ-3 бурилась в сравнительно легких геологических условиях: устойчивый ствол, отсутствие осложнений с осыпанием стенок скважины, отсутствие пластов, насыщенных пластовым флюидом. И как следствие применение буровых растворов низкой плотности при сравнительно низких градиентах температур (менее 1,50 °C/100 м).

Рассмотрим возможности углубления скважины в таких же условиях при современных технических и технологических возможностях на глубину 15000 м. Конструкция скважины представлена на рисунке 1.

Конструкция научно-поисковой скважины глубиной 15 000 м.

Колонны 426 мм	0 – 300 м
324мм	0 – 3 000 м
245 мм	0 – 9 000 м
Открытый ствол	9 000 – 15 000 м.

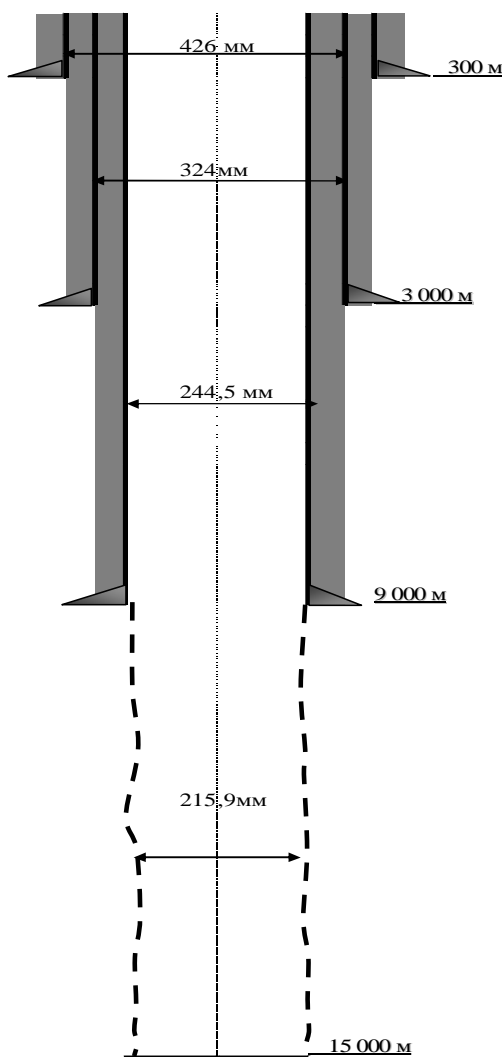


Рисунок 1 – Конструкция скважины глубиной 15000 м



Скважина обсажена 245 мм обсадной колонной на глубину 9000 м. Продолжение бурения скважины невозможно без применения алюминиевых труб. Рассмотрим возможность углубления скважины с позиций грузоподъемности буровой установки, прочности бурильной колонны с одной стороны и гидравлических показателей скважины и насосной группы буровой установки. Для этого были использованы компьютерные программы «Бурильная колонна», «Гидравлика Бурения» и «Гидравлика крепления».

Бурильная колонна предварительно была принята комбинированная. Компоновка низа колонны (КНБК) состоит из 178 мм утяжеленных бурильных труб с внутренним проходом 80 мм и длиной 120 м. Состав комбинированной бурильной колонны снизу вверх: ЛБТ 114 мм длиной 6000 м (с внутренним диаметром 94 мм, стальной замок типа ЗЛ диаметром 140 мм и внутренним диаметром 80 мм); ЛБТ 129 мм длиной 3000 м (с внутренним диаметром 111 мм, стальной замок типа ЗЛ диаметром 152 мм и внутренним диаметром 95 мм); ЛБТ 147 мм длиной 3000 м (с внутренним диаметром 117 мм, стальной замок тип ЗЛ диаметром 172 мм и внутренним диаметром 110 мм); СБТ 140 мм группа стали Р остальное по длине (с внутренним диаметром 118,5 мм, замок ЗП-184-89).

Предложенная компоновка требует изменения, поскольку трубы АБТ 129 марки Д16Т верхней части интервала 8874–5874 м, а также трубы АБТ 147 по верхней части интервала 5874–2874 м не проходят по коэффициенту запаса прочности. Поэтому требуется замена алюминиевых труб марки Д16Т на трубы из сплава 1953 Т1.

Фактически по прочностной характеристике принятых труб (табл. 1) возможности исчерпаны.

**Таблица 1** – Расчет бурильной колонны на прочность (отрыв от забоя с промывкой): интервал бурения, м, 14500 – 15000; глубина спуска обсадной колонны диаметром 245 мм – 9000 м; тип бурения – забойный двигатель

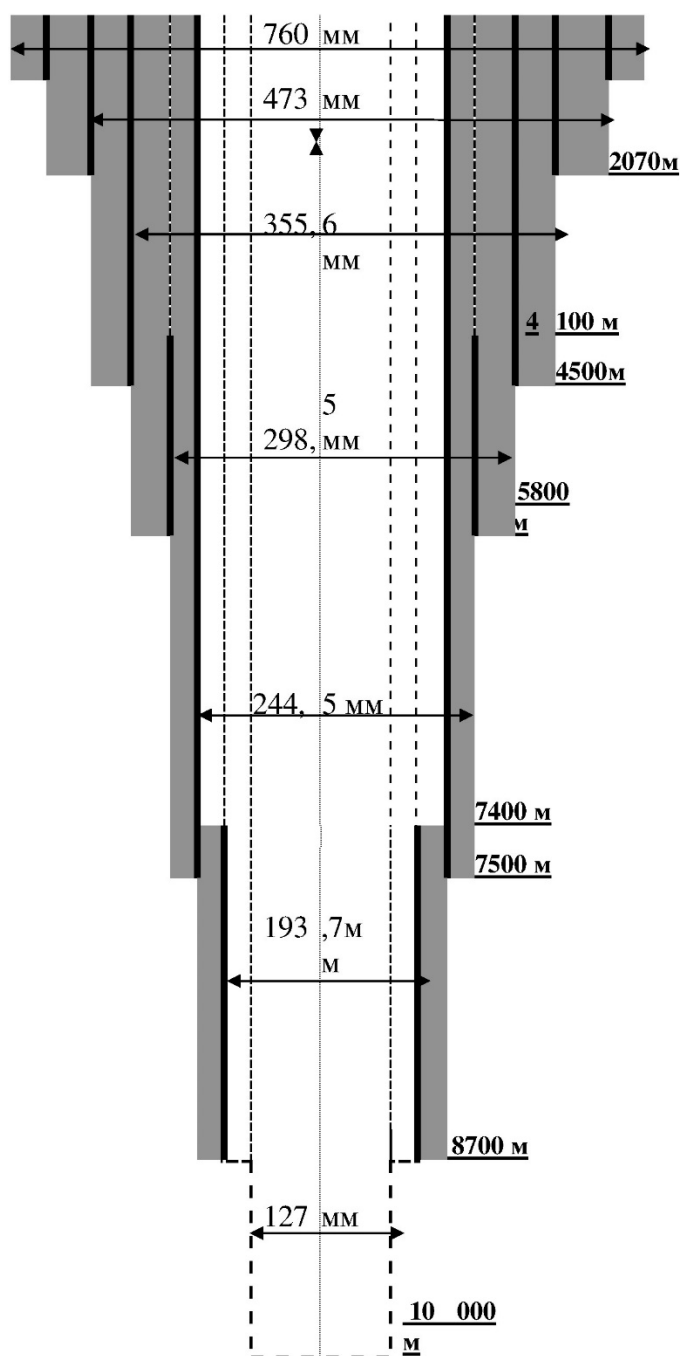
Интервал, м	Тип секции	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Группа прочности	Длина секции, м	Вес секции в воздухе, кН	Вес колонны в воздухе, кН	Осевая сила, кН	Эквивалент напряжения, МПа	Коэффициент запаса на стат. прочность
15000 14994	Заб. двиг.	172			6	9	9	0,1 7,9	0 0,9	>10 >10
14994 14874	УБТ	178	49	38ХНЗМ ФА	120	120	183,4	8,1 167,7	0,9 8,4	>10 >10
14874 8874	АБТ	114,3	10	Д16Т	6000	659	851,5	167,9 612,8	51,2 187	6,3 1,7
8874 5874	АБТ	129	9	Д16Т	3000	358,9	1210,4	612,8 855,1	180,6 252	1,8 1,3
5874 2874	АБТ	147	9	Д16Т	3000	358,9	1634,1	855,1 1141,2	219,2 292,5	1,5 1,1
2874 0	СБТ	139,7	10,5	Р	2874	2874	2834,9	1141,2 2100,9	267,8 514,1	3,5 1,8

По программе промывки на глубине 14900 м при подаче 22 л/с давление на насосе превысит 30,0 МПа.

Сложно обеспечить рабочий режим забойного двигателя, поскольку невозможно создать необходимую подачу из-за слишком высокого давления. Требуется разработка забойных двигателей, которые бы имели оптимальные режимные параметры при высоких давлениях на насосе (25,0–32,0 МПа). Следует отметить, что столь высокие давления обусловлены большими гидравлическими потерями в полости труб и кольцевом пространстве на больших глубинах.

Механическая скорость бурения на больших глубинах ограничивается 3–5 м/ч, но, чтобы обеспечить такую скорость надо находить оптимальное соотношение величин режимных параметров углубления для соответствующего типа долота и размеров насадок [3]. Струи из насадок должны предотвращать образование нежелательной «подушки» из перемолотой породы на забое.

На рисунке 2 представлена предлагаемая конструкция скважины, бурящейся на глубину 10000 м, геологический разрез которой представлен несовместимыми условиями для совместного вскрытия и эти интервалы надо перекрывать обсадными колоннами и хвостовиками. Предполагается для вскрытия интервала 0–150 м потребуются иметь плотность бурового раствора 1100–1150 кг/м<sup>3</sup> для предотвращения осыпей и перекрытия водоносных пластов. По другим интервалам плотность бурового раствора рассчитывалась с целью недопущения неуправляемого поступления пластового флюида и поглощения бурового раствора. Значения плотностей бурового раствора приведены в таблице 2.



**Рисунок 2** – Конструкция поисковой скважины глубиной 10 000 м.

Чтобы обеспечить безаварийное бурение и эффективный спуск обсадных колонн в условиях малых зазоров предусматривается расширка ствола, используя для этого бицентричные долота в интервалах 4500–5800 м, 5800–7500 м, 7500–8700 м. Отметим, что увеличение зазора между стенками скважины и спускаемой колонны, необходимо для обеспечения качественное заполнение за трубные пространства тампонажным раствором.

- 30 in – 760 мм – 150 м;
- 18 5/8 in – 473 мм – 2070 м;
- 14 in – 355,6 мм – 4500 м;
- 11 3/4 in – 298, 5 мм – 4100–5800 м;
- 9 5/8 in – 245 мм – 7500 м;
- 7 5/8 in – 193, 7 мм – 7400–8700 м;
- 5 1/2 in – 127 мм – открытый ствол, при необходимости спускается комбинированная колонна.

Результаты расчетов гидравлических характеристик скважины бурящейся на 10000 м разрез, которой представлен аномально высокими пластовыми и поровыми давлениями (см. таблицу 2).



**Таблица 2** – Гидравлические показатели скважины, бурящейся на 10000 м

№ п/п	Интервал бурения, м	d долота, мм	Плотн., кг/м <sup>3</sup>	Q, л/с	P <sub>нас</sub> кгс/см <sup>2</sup>	V <sub>прох.</sub> м/час	Транспорт шлама		Комп. БК, мм	Объем, М <sup>3</sup>	Мощность, кВт
							Эффек., %	Концен., %			
1	150–2500	660	1150	65	54/150	5/3	76/79	0,9/0,5	140	55/850	975/152
2	2500–4500	431,8	1800	45	145/207	5/3	94/95	0,4/0,23	140/127	368/652	931/112
3	4500–5800	311	1450	35	126/147	5/3	85/89	0/3/0,2	140/127/129	324/462	515/55
4	5800–7500	245	1800	32	195/220	5/3	93	0,21	140/127/129	390/512	704/142
5	7500–8700	216	1230	24	217/220	5/3	84	0,22	140/127/129/90	231/270	580/47
6	8700–10000	149,2	1150	20	202/228	3/2	81	0,085	140/127/129/90	233/252	456/71

Имеющиеся отечественные буровые насосы не обеспечивают необходимый режим промывки. Для бурения глубоких скважин требуются буровые насосы с гидравлической мощностью, превышающей 2100 кВт и с максимальным на выходе давлением 60,0 МПа.

При бурении верхних интервалов очень важно иметь большую подачу насосов при сравнительно небольшой механической скорости бурения. При скорости бурения 5 м/с долотами более 444,5 мм в интервале 150–2500 м уменьшение подачи менее 65 л/с существенно снизится эффективность транспорта шлама, что чревато образованием сальников на долоте, элементах оснастки низа бурильной колонны и на муфтах самой бурильной колонны. Для качественного выноса шлама на поверхность необходимо поддерживать соответствующие реологические показатели бурового раствора. Конкретно, для рассматриваемых условий бурения при плотности бурового раствора 1150 кг/м<sup>3</sup> и подачи 65 л/с следует поддерживать пластическую вязкость на уровне 20 спз, а динамическое напряжение сдвига 14 Па.

Объем скважины, и, следовательно, объем бурового раствора на этапе бурения долотами большого диаметра превысит 850 м<sup>3</sup>, но по мере углубления скважины и перехода на меньшие диаметры долот, требуемые объемы бурового раствора будут снижаться, но все же достаточно велики. Повышаются требования к циркуляционной системе с точки зрения емкостных объемов и элементам очистки бурового раствора от выбуренной породы. Поэтому бурение скважины при современных возможностях бурового оборудования и скважинного инструмента, будет осуществляться при механических скоростях, не превышающих 5 м/час.

Гидравлический режим бурения на глубине свыше 3000 м, предусматривающий подачу буровых насосов на уровне 30 л/с и давлении на выходе насоса более 20,0–22,0 МПа существенно отличается от рабочих режимов массового бурения. Именно это накладывает дополнительные требования на прочностные характеристики элементов циркуляционной обвязки и на подготовку буровой бригады проводить работы длительное время при высоких давлениях.

В таблице 3 приведены сведения о бурильной колонне и расчет ее на прочность на этапе строительства скважины в интервале 8700–10000 м в процессе бурения и при отрыве от забоя с промывкой.

**Таблица 3** – Расчет бурильной колонны на прочность: скважина № 2; рабочий процесс – бурение; интервал бурения – 8700–10000 м; глубина спуска обсадной колонны – 8700 м; месте (площадь) – БББББААА; глубина спуска бурильной колонны – 10000 м; тип бурения – роторный

Интервал, м от – до	Номер секции	Тип секции	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Группа прочности	Длина секции, м	Вес секции в воздухе, кН	Вес колонны в воздухе, кН	Осевая сила, кН	Эквивалентное напряж., МПа
10000	0	СБТ	88,9	9,4	М	2600	558,3	558,3	–40	23,8
7400									436,5	187,5
7400	1	АБТ	129	10	1953Т1	6165	846,4	1404,8	436,6	117,2
1235									969	263,4
1235	2	СБТ	127	9,2	М	1235	397	1801,8	969	289,3
0									1307,8	388,7



Расчет бурильной колонны на прочность. Скважина № 2. Отрыв от забоя с промывкой. Интервал бурения: 8700–10000 м. Глубина спуска обсадной колонны – 8700 м. Месте (площадь) – БББББААА. Глубина спуска бурильной колонны – 10000 м. Тип бурения – роторный

Интервал, м от – до	Номер секции	Тип секции	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Группа прочности	Длина секции, м	Вес секции в воздухе, кН	Вес колонны в воздухе, кН	Осевая сила, кН	Эквивалентное напряж., МПа
10000	0	СБТ	88,9	9,4	М	2600	558,3	558,3	0	6,1
7400									476,5	204,4
7400	1	АБТ	129	10	1953Т1	6165	846,4	1404,8	476,6	127,9
1235									1009	273,9
1235	2	СБТ	127	9,2	М	1235	397	1801,8	1009	300,8
0									1347,8	400,3

Бурильная колонна должна состоять из трех-четырех секций. Одна из секций должна собираться из алюминиевых труб из сплава 1953Т1. Стальная часть бурильной колонны должна быть собрана из труб группы прочности М. Вес бурильной колонны в воздухе превысит 180 тонн, а в буровом растворе 156 тонн. Очевидно, что все приведенные величины предельны. И фактически при строительстве скважин, в разрезе которых имеют место несовместимые условия, на современном оборудовании и буровом инструменте, можно с большим трудом углубиться не более, чем на 10000 м. Продолжительность строительства скважин такой глубины составит 2–2,5 года.

Поиск нефти на таких глубинах в твердых породах имеет основание, поскольку в них имеются сеть трещин, и, следовательно, возможны скопления нефти. Пример тому месторождение «Белый Тигр», находящейся в шельфовой зоне Южно- Китайского моря, где из фундамента, представленного гранитами, добыто и продолжает добываться миллионы тонн нефти. На месторождении есть скважины, у которых суточный дебит превышает 1000 тонн.

Итак, показаны предельные возможности существующего оборудования и скважинного инструмента. Нужно научиться бурить скважины глубиной более 7000 м с целью открытия крупных месторождений нефти и одновременно находить пути проникновения вглубь земли на 15–30 км.

### Литература

1. Булатов А.И. Мифы и реальность Земли и Космоса. – Краснодар : Просвещение-Юг, 2013. – Т. 6: Планета Земля. – 682 с.
2. Гидравлика бурения. – Свидетельство № 2002611701, РОСПАТЕНТ, 4 октября 2002 г.
3. Бабаян Э.В. Буровые технологии, 2-е изд. доп. – Краснодар : Совет. Кубань, 2009. – 896 с.
4. Гидравлика крепления. – Свидетельство № 2002611700, РОСПАТЕНТ, 4 октября 2002 г.
5. Инструкция по расчету бурильных колонн для нефтяных и газовых скважин. АООТ «ВНИИТнефть». – М., 1997.

### References

1. Bulatov A.I. Myths and reality of the Earth and Space. – Krasnodar : Enlightenment-South, 2013. – Vol. 6: Planet Earth. – 682 p.
2. Hydraulics drilling. – Certificate № 2002611701, ROSPATENT, October 4, 2002.
3. Babayan E.V. Drilling Technologies, 2nd ed. add. – Krasnodar : Soviet Kuban, 2009. – 896 p.
4. Hydraulics of fastening. – Certificate № 2002611700, ROSPATENT, October 4, 2002.
5. Instructions for calculating drill strings for oil and gas wells. AOOT VNIITneft. – M., 1997.