РАСХОД БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ. ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ БУРЕНИЯ

MUD FLOW RATE IN THE CONSTRUCTION OF SUBMERGED CROSSING TRUNK
PIPELINES BY DIRECTIONAL DRILLING METHOD.
THE FORMATION OF HYDRAULIC DRILLING PROGRAM

В работе рассмотрены вопросы по формированию гидравлической программы бурения при строительстве подводных переходов магистральных нефтепроводов методом наклонно-направленного бурения. Необходимость в определении реологических свойств, промывки скважин и расхода бурового раствора обусловлена технологией ведения работ, дискретностью приготовления раствора в процессе бурения, отсутствием возможности создания замкнутой системы циркуляции.

В процессе строительства скважины подводного перехода обеспечение постоянной промывки крайне важно. Циркуляция бурового раствора обеспечивает своевременную очистку ствола и забоя скважины, охлаждает рабочие элементы бурового инструмента, способствует разрушению породы и предупреждению возможных осложнений.

Практикуется два технологических подхода по строительству ствола скважины подводного перехода с пониженным и повышенным расходом раствора.

Первый подход осуществляется за счет размягчения (разжижения) грунта и проталкивания породоразрушающего инструмента при этом бурение происходит без существенной очистки скважины.

Строительство скважины перехода с применением второго подхода осуществляется с периодическим возвратом породоразрушающего инструмента в ранее пробуренный интервал, промывкой и повторной проработкой или при сниженных механических скоростях для данного интервала и интенсивной промывкой. В таком случае происходит снижение риска возникновения технологических осложнений, но при этом увеличиваются затраты на непроизводительное время бурения.

Гидравлическая программа бурения может значительно отличаться исходя из применяемой технологии строительства. В работе предложена система расчета реологических свойств, промывки скважин и расхода бурового раствора в зависимости от технического и технологического опыта организации, осуществляющей буровые работы.

The paper discusses issues on the formation of hydraulic drilling program in the construction of underwater crossings of trunk pipelines by directional drilling. The need to determine the rheological properties, flush the well and mud flow-rate conditioned to the work technology, a discrete solution in the drilling, lack of ability to create a closed circulation system.

In the process of well construction underwater crossing ensuring permanent flushing is extremely important. Circulation of drilling mud ensures timely cleaning of the barrel and the bottom of the well, cools the working elements of drilling tools, contributes to the destruction of the breed and prevent possible complications

Two technological approaches for the construction of a well bore underwater crossing are being practiced, with a reduced and increased solution flow rate.

The first approach is carried out due to softening (fluidifying) of soil and pushing the rock cutting tool while drilling takes place without essential cleaning of the well.

Construction of the well of transition with application of the second approach is carried out with periodic return of the rock cutting tool to the previously drilled interval, by washing and re-working or at the reduced mechanical speeds for this interval and intensive washing. In that case there is a reduction in risk of technological complications, but at the same time increases the cost of unproductive time of drilling increase.

The hydraulic program of drilling can differ considerably based by the applied technology of construction. The paper proposes the system of calculation of rheological properties, washing of wells and a consumption of drilling mud fluid depending on technical and technological experience of the organization which is carrying out drilling operations.

**Шарафутдинов З. З.,
Сапсай А. Н., Вафин Д. Р.,
Шаталов Д. А.**

ООО «НИИ Транснефть», ПАО
«Транснефть», г. Москва
Российская Федерация

**Z. Z. Sharafutdinov, A. N. Sapsay,
D. R. Vafin, D. A. Shatalov**

Transneft R&D, LLC,
PJSC Transneft, Moscow, Russian
Federation

Ключевые слова:

подводный переход трубопровода,
наклонно-направленное бурение,
буровой раствор, расход бурового
раствора, бурение скважин с
большим диаметром.

Key words:

submerged crossing trunk pipelines,
directional drilling, drilling mud, mud
flow rate, large-hole drilling.

Введение

При проектировании подводных переходов магистральных нефтепроводов методом наклонно-направленного бурения определение необходимого расхода бурового раствора является технически сложным вопросом, требующим своего разрешения.

В процессе строительства скважины подводного перехода циркуляция бурового раствора обеспечивает очистку ствола и забоя скважины, охлаждает рабочие элементы бурового инструмента, способствует разрушению породы и предупреждению возможных осложнений [1–3].

Практикуются два технологических подхода по строительству ствола скважины подводного перехода с пониженным и повышенным расходом раствора.

Первый подход осуществляется за счет размягчения (разжижения) грунта и проталкивания в него породоразрушающего инструмента. Бурение при этом происходит без существенной очистки скважины. Данный подход применим при строительстве переходов с малыми диаметрами и длиной, в грунтах с низкими прочностными характеристиками и неприменим при строительстве в пластичных глинах или в гравийно-галечниковых отложениях. Для реализации такого подхода необходимо применение мощной буровой установки. При этом существует возможность гидроразрыва грунта, т. к. канал выхода бурового раствора из скважины будет забиваться шламом, а при бурении в скальном грунте эффективность бурения снижается из-за повторного перемалывания грунта на забое скважины, очагового накопления шлама по стволу скважины. Расширение пилотной скважины с применением подобной технологии способно привести к возникновению технологических осложнений и аварийных ситуаций вследствие формирования скважины, непригодной для осуществления процесса протаскивания. Однако подчеркнем, что реализация подобной технологии имеет место в практической деятельности.

Строительство скважины перехода с применением второго подхода осуществляется с периодическим возвратом породоразрушающего инструмента в ранее пробуренный интервал, промывкой и повторной проработкой или при сниженных механических скоростях для данного интервала и интенсивной промывкой. В таком случае происходит снижение риска возникновения технологических осложнений, но при этом увеличиваются затраты на непроизводительное время

бурения. Подход с повышенным расходом бурового раствора требует строгого отношения к формированию его состава, а также высокой квалификации бурового персонала. Такой подход более универсален, т. к. лучше учитывает инженерно-геологические условия строительства. Для его реализации необходимо формирование гидравлической программы бурения.

В процессе бурения подача насосов должна обеспечивать очистку буровым раствором забоя скважины от шлама и транспортировку его через кольцевое пространство, предотвращать формирование сальников на породоразрушающем инструменте [3], т. е. формирование требуемых реологических параметров бурового раствора.

Формирование требований к реологическим свойствам буровых растворов

Начальным условием проведения расчетов по определению величины давления на насосе, содержания шлама в растворе является задание реологических параметров бурового раствора [1, 2]. Проектирование реологических параметров для промывки ствола скважины ведут из условия $\gamma = 0,04-200 \text{ с}^{-1}$, исходя из необходимости придания буровому раствору максимальной выносной способности. Такая задача реализуется при увеличении расхода бурового раствора или обеспечении ему высоких структурно-механических свойств.

Размер частиц шлама для монолитных грунтов определяется конструкцией бурового инструмента, а для несвязных грунтов их природным размером и фракционным составом.

Например, при бурении шарошечными долотами для определения размера обломков породы предложена формула [2]

$$d = 0,56\sqrt{(t-b)l}, \quad (1)$$

где t — максимальный шаг зубьев шарошки, м;
 b — ширина зубьев в плоскости забоя, м;

Рисунок 1.

Величины динамического напряжения сдвига бурового раствора, необходимые для выноса частиц шлама с различной плотностью (числа в легенде указывают на плотность частиц шлама, кг/м^3)

l — высота зубьев, м. Для инструмента режуще-скалывающего действия размер частиц грунта можно принять соответствующим размеру разрушающего элемента или величине его выхода из корпуса инструмента.

Буровой раствор, обладающий величиной $\tau_0 \sim 40\text{--}60$ Па, способен вынести частицы шлама с эффективным диаметром не более 2–3 см с плотностью шлама около 2000 кг/м³ (рисунок 1).

Исходя из того, что при большом диаметре ствола скважины производительность насоса почти не влияет на транспортирующую способность шлама (рисунок 2), то управлять ею необходимо за счет регулирования реологических параметров бурового раствора или конструкции расширителя. Таким образом, появляется необходимость совместного ограничения технических свойств буровых растворов и расширителей по их конструкции, количеству и виду разрушающих элементов.

Экономически целесообразный расход реагентов-структурообразователей позволяет обеспе-

чить величину динамического напряжения сдвига бурового раствора до ~ 40 Па (рисунок 3). Необходимость достижения более высоких величин динамического напряжения сдвига бурового раствора требует значительного увеличения расхода реагентов, что в значительной степени увеличит стоимость применяемого бурового раствора.

Из этого вытекает несколько инженерно-технических условий для бурения в монолитных грунтах:

1. При прохождении глинистых отложений, скальных грунтов отсутствует необходимость в значительном повышении реологических параметров бурового раствора. Граничная величина динамического напряжения сдвига у применяемого бурового раствора не должна превышать 40 Па.

2. В конструкции породоразрушающего инструмента следует избегать значительного увеличения площади забоя, а способ разрушения грунта и размещение вооружения следует

Рисунок 2.

Величины скоростного напора в стволе скважины при ее различных диаметрах и расходе бурового раствора, (числа в легенде указывают на расход бурового раствора, л/с)

Рисунок 3.

Влияние содержания реагента-структурообразователя на величину предельного динамического напряжения сдвига бурового раствора

совмещать со свойствами используемых буровых растворов.

3. Следует принять, что при использовании расширителей с пальцевым или шарошечным вооружением необходимо применять буровые растворы с максимально допустимыми реологическими показателями растворов.

4. Для инструмента с режущим вооружением на бочкообразном расширителе можно снижать величину реологических показателей из условия их возможной регенерации. Отработанный буровой раствор способен проходить через установку регенерации, имеющую вибросито с размером ячейки 177–250 мкм (60–80 меш), при динамическом напряжении сдвига 15–25 Па.

При прохождении несцементированных грунтов ситуация по формированию реологических параметров бурового раствора изменяется. Это обусловлено действием следующих факторов. Поведение бурового раствора в проницаемом канале складывается из двух процессов: фильтрации самого бурового раствора и коагуляции проницаемого канала его компонентами. В процессе фильтрации буровой раствор под действием перепада давления между скважиной и проницаемым грунтом движется вплоть до разрушения своей структуры. Разрушение структуры бурового раствора будет обусловлено прочностью исходной структуры раствора, сопротивлением пласта. По мере разрушения и разделения структуры бурового раствора начнется процесс коагуляции проницаемого пласта компонентами бурового раствора.

На равномерность распределения и глубину проникновения бурового раствора влияет величина давления при его закачке, прочность связей в объеме раствора. Если раствор представляет собой единую структурированную систему, а не разбитую на отдельные структурированные кластеры,

то происходит процесс его фильтрации. Поэтому значительную роль при прохождении процессов фильтрации играет прочность связей в объеме жидкости.

Анализ результатов исследований фракционного состава глинистых суспензий [5], а также процесса фильтрации технологических растворов в образцах из песка различного фракционного состава [6–8] показал, что при значениях перепада давления от 0,2 до 0,7 МПа фильтрация технологического раствора проходит на полную длину образца с сохранением его геометрических размеров при значениях коэффициента пластичности 800–3000 с⁻¹ (рисунок 4). При обеспечении величины коэффициента пластичности бурового раствора $\tau_0/\eta > 1300$ достигается не только фильтрация бурового раствора, но и укрепление образцов несцементированного грунта за счет увеличения прочности взаимосвязей между компонентами бурового раствора и частицами грунта.

Поэтому в процессе формирования ствола скважины подводного перехода в несцементированных грунтах в первую очередь стоит техническая задача — обеспечить их насыщение буровым раствором, обладающим величиной коэффициента пластичности τ_0/η не менее 1300 с⁻¹. Процесс поглощения в этом случае не является технологическим осложнением, а становится фактором, обеспечивающим упрочнение несцементированных грунтов и условием успешного строительства подводного перехода.

Чрезвычайно значимым фактором при прохождении несцементированных грунтов является их фракционный состав. Буровой раствор при обладании величиной динамического напряжения сдвига $\tau_0 = 60$ Па не способен вынести частицы с плотностью 2650 кг/м³ и размером более 1–2 см, поэтому все фракции несцементированного грунта более 2 см останутся в скважине. Накопление шламовых

Рисунок 4.

Влияние коэффициента пластичности дисперсных систем с различным фракционным составом на степень их фильтрации через образцы несцементированного грунта

подушек на нижней образующей скважины приведет к тому, что в процессе протаскивания трубопровода вследствие законов механики трубопровод отклонится от траектории своего движения, упрется в свод скважины с его разрушением и обвалом ствола скважины. В результате чего трубопровод будет защемлен в скважине и возникнет аварийная ситуация с потерей трубопровода и скважины.

Поэтому проанализируем условия сужения диаметра скважины вследствие загромождения (зашламования) ее дна крупными фракциями с диаметром, превышающим размер частиц, удовлетворяющим условиям выноса из скважины — d_0 . Если принять, что остающиеся в скважине крупные фракции откладываются в нижнем сегменте ее поперечного сечения горизонтальным слоем, то относительную высоту слоя Δ на вертикальной оси скважины диаметром D_c можно определить из выражения (2)

$$\frac{\Delta}{D_c} = \frac{1 - \cos \alpha / 2}{2}, \quad (2)$$

где α — центральный угол сегмента находится из уравнения (3).

$$\kappa \kappa_r n = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{180} - \frac{\sin \alpha}{\pi} \right), \quad (3)$$

где κ и κ_r соответственно коэффициент кавернозности и коэффициент разрыхления породы; n — объемная доля крупных фракций (диаметром более d_0) в составе грунта.

В таблице 1 приведены результаты величин Δ/D_c , $D_c/(D_c - \Delta)$ в зависимости от n при $\kappa \kappa_r = 1,2$.

Таблица 1.

Параметры сужения ствола скважины в зависимости от объемной доли крупных фракций в составе разбуриваемой породы

n	α , град	Δ / D_c	$D_c / (D_c - \Delta)$
0,055	80	0,117	1,13
0,1	100	0,178	1,22
0,163	120	0,25	1,33
0,238	140	0,329	1,49

Как видно из таблицы, при концентрации крупных фракций, не транспортируемых буровым раствором, $n > 0,1$ проходное отверстие ствола скважины $D_c / (D_c - \Delta)$ исчерпывает проектный запас $D_c / D_n = 1,2$. При наибольшей величине запаса $D_c / D_n = 1,5$ объемное содержание крупных фракций в составе грунта не должно превышать 25 % при условии, что реологические свойства бурового раствора позволяют поддерживать во взвешенном состоянии и транспортировать 75 % частиц крупностью менее d_0 .

Из этого следует несколько практических требований:

1. При прохождении несцементированных грунтов необходимо применять буровые растворы, обладающие показателем пластичности τ_0 / η не

менее 1300 с^{-1} , подобные буровые растворы способны закреплять стенки скважины за счет своей фильтрации в объем несцементированного грунта.

2. Буровые растворы, обладающие показателем пластичности τ_0 / η не менее 1300 с^{-1} , не обеспечивают выноса частиц несцементированного грунта более 1–2 см (рисунок 1). Поэтому при строительстве подводных переходов трубопроводов в условиях залегания гравийно-галечниковых грунтов необходимо применение специальных конструкций породоразрушающего инструмента, способного в процессе бурения за счет работы своего корпуса механически вдавливать крупно-размерные частицы грунта в стенки скважины или распределять его по стволу скважины, не позволяя формироваться на нижней образующей гравийным подушкам (дюнам).

Несколько отличаются требования к буровым растворам, применяемым при прохождении глинистых отложений. Кроме условия выноса разбуренного грунта буровой раствор должен обеспечивать устойчивость стенок скважины, сложенных глинистыми грунтами. Данная задача несколько облегчается, т.к. борьбу с формированием сальников при бурении в пластичных глинах наиболее эффективно решать за счет применения рациональной технологии расширения и повышения эффективности породоразрушающего инструмента, т.е. его конструкции.

Устойчивость глинистых грунтов в процессе строительства подводных переходов путем реализации метода наклонно-направленного бурения необходимо решать лишь для глинистых отложений, величина показателя пластичности (I_p) которых равна 7, т.е. малой впитывающей способностью по отношению к воде. При контакте с водой из состава бурового раствора и ее впитывания подобные глины, увеличиваясь в объеме, быстро разрушают стенки скважины. Подобное поведение глины способно привести к попаданию протаскиваемого трубопровода в каверну на верхней образующей скважины, возникновению затяжек при протаскивании, вплоть до создания аварийной ситуации с защемлением трубопровода в скважине.

Расчет необходимой подачи насосов

В процессе строительства подводного перехода необходимо обеспечить постоянную промывку скважины. Объем бурового раствора для строительства подводного перехода складывается из объема раствора, необходимого для бурения пилотной скважины, расширения, калибровки и протаскивания трубопровода.

Объем бурового раствора, необходимый для строительства скважины перехода определяется из условия обеспечения достаточной подачи бурового раствора для эффективного разрушения грунта, отсутствия возможности его повторного перемалывания и формирования сальников на буровом

инструменте. Подача насоса также должна реализовывать гидромониторный эффект при разрушении породы и очистки забоя. Поэтому необходимый объем бурового раствора будет отличаться в зависимости от использования породоразрушающего инструмента с гидромониторным или дробящим, режущим принципом действия.

При использовании инструмента режуще-скалывающего или дробяще-скалывающего типа объем бурового раствора и, соответственно, подача насосов ведется из условия величины механической скорости бурения, реализуемой при строительстве скважины подводного перехода. Так, например, при подаче насоса 30 л/с и диаметре скважины 1600 мм скорость бурения не должна превышать 5–6 м/час, но эта величина не отвечает за эффективность работы бурового инструмента. Поэтому выработан подход, когда задается величина допустимого или безопасного содержания шлама в объеме бурового раствора.

Более подробно вопросы определения объемов бурового раствора в зависимости от применяемой технологии строительства скважины подводного перехода рассмотрены в статье [9].

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Булатов А. И., Аветисов А. Г. Справочник инженера по бурению. В 2-х т. М.: Недра, 1985. Т. 1. 520 с.
- 2 Маковой Н. Гидравлика бурения. М.: Недра, 1986. 600 с.
- 3 Технология бурения глубоких скважин / М. Р. Мавлютов, Л. А. Алексеев, К. И. Вдовин и др.; под общ. ред. М. Р. Мавлютова М.: Недра, 1982. 287 с.
- 4 Проектирование строительства скважин для подводных переходов магистральных нефтепроводов в ОАО «АК «ТРАНСНЕФТЬ» / Ю. И. Спектор, А. Б. Крепнюк, Н. Т. Овчинников, З. З. Шарафутдинов // Нефтегазовое дело. Уфа, 2003. С. 153–167.
- 5 Газизов А. А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. 639 с.
- 6 Земляной А. А. Совершенствование методов изоляции водоприток в скважинах с горизонтальным окончанием: дис.... канд. техн. наук. Уфа, 2016. 125 с.
- 7 Исследование процесса фильтрации водоизоляционных составов в проницаемые среды / А. А. Земляной, С. Л. Голофаст, А. В. Трифонов, А. В. Белов, Е. Н. Козлов // Нефтяное хозяйство. 2015. № 6. С. 72–75.
- 8 Шарафутдинов З. З. Чегодаев Ф. А., Шарафутдинова Р. З. Буровые и тампонажные растворы. Теория и практика. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. 424 с.
- 9 Спектор Ю. И., Шарафутдинов З. З. Расчет объемов бурового раствора при проектировании строительства скважины подводного перехода // Трубопроводный транспорт: теория и практика. М.: 2006. № 4. С. 58–64.

Заключение

Условия, оказывающие влияние на потребление бурового раствора в процессе строительства скважины подводного перехода, представлены инженерно-геологическими условиями, производительностью применяемого оборудования, возвратом бурового раствора в циркуляционную систему. Расход раствора взаимосвязан с применяемыми техническими средствами бурения, реализуемой технологией, а также со свойствами применяемых буровых растворов. Возврат бурового раствора за счет его регенерации при величинах динамического напряжения сдвига бурового раствора в диапазоне от 0 до 25 Па определяется производительностью установки по регенерации бурового раствора. При динамическом напряжении сдвига бурового раствора более 40 Па за счет необходимости его разбавления водой для снижения реологических параметров будет перерабатываться около 30–40 % бурового раствора, выходящего из скважины. Поэтому в процессе строительства подводного перехода будет осуществляться опережающий темп воспроизводства бурового раствора.

REFERENCES

- 1 Bulatov A. I., Avetisov A. G. *Spravochnik inzhenera po bureniyu. V 2-h t.* [Drilling engineer: Handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1985, vol. 1, 520 p. [in Russian].
- 2 Makovei N. *Gidravlika bureniya.* [Hydraulic drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 600 p. [in Russian].
- 3 Mavlyutov M. R., Alekseev L. A., Vdovin K. I. et. c. *Tehnologiya bureniya glubokih skvazhin* [Deep drilling technology] Moscow, Nedra Publ., 1982. 287 p. [in Russian].
- 4 Spektor Yu. I., Skrepnyuk A. B., Ovchinnikov N. T., Sharafutdinov Z. Z. Designing of well construction for underwater transitions pipelines in OAO Transneft Petroleum. *Neftgazovoe delo — Oil and gas business*, Ufa, 2003. pp. 153–167. [in Russian].
- 5 Gazizov A. A. *Uvelichenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov na pozdnei stadii razrabotki* [Increased recovery of heterogeneous reservoirs at the late stage of development]. Moscow, Nedra — Business Center Publ., 2002. 639 p. [in Russian].
- 6 Zemlyanoi A. A. *Sovershenstvovanie metodov izolyatsii vodopritokov v skvazhinah s gorizontalnym okonchaniem: dis.... kand. tehn. nauk.* [Improvement of methods of water influx isolation in wells with horizontal end. Cand. tech. sci. dis.]. Ufa, 2016. 125 p. [in Russian].
- 7 Zemlyanoi A. A., Golofast S. L., Trifonov A. V., Belov A. V., Kozlov E. N. Study on the filtration process watertight structures in permeable Wednesday. *Neftyanoe hozyajstvo — Oil industry*, 2015, no. 6, pp. 72–75. [in Russian].
- 8 Sharafutdinov Z. Z., Chegodaev F. A., Sharafutdinova R. Z. *Burovyie i tamponazhnye rastvory. Teoriya i praktika.* [Drilling and Grouting mortars. Theory and

practice]. St. Petersburg, Professional Publ., 2006. 424 p. [in Russian].

9 Spector Yu. I., Sharafutdinov Z. Z. Calculation of the volume of drilling fluid in well construction design of underwater navigation *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika — Pipeline transport: theory and practice*, 2006, no. 4, pp. 58–64. [in Russian].

Шарафутдинов З. З., д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник центра технологии строительства, обследования зданий и сооружений, испытательных лабораторий ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Российская Федерация

Z. Z. Sharafutdinov, Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher of Center for Construction Methods, Inspection of Buildings and Facilities, Transneft R&D, LLC, Moscow, Russian Federation
e-mail: SharafutdinovZZ@niitnn.transneft.ru

Сапсай А. Н., вице-президент ПАО «Транснефть», г. Москва Российская Федерация

A. N. Sapsay, Vice President PJSC Transneft, Moscow, Russian Federation

Вафин Д. Р., научный сотрудник лаборатории линейной части и подводных переходов ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Российская Федерация

D. R. Vafin, Research Assistant of Linear Pipeline and Underwater Line, Transneft R&D, LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: VafinDR@niitnn.transneft.ru

Шаталов Д. А. канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией линейной части и подводных переходов ООО «НИИ Транснефть», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: ShatalovDA@niitnn.transneft.ru

D. A. Shatalov Candidate of Engineering Sciences, Assistant Laboratory Chief of Linear Pipeline and Underwater Line, Transneft R&D, LLC, Moscow, Russian Federation