

Формирование ствола скважины на границе инженерно-геологических элементов при строительстве трубопроводов методом ННБ

Р.А. Капаев

главный специалист отдела сопровождения ПИР объектов ТПР и КР
КапаевРА@ak.transneft.ru

ПАО «Транснефть», Москва, Россия

Статья посвящена изучению вопросов изменения траектории ствола скважины для протаскивания трубопровода на границе изменения физико-механических свойств разбуриваемых грунтов при строительстве магистральных трубопроводов методом наклонно-направленного бурения.

В данной работе рассмотрены вопросы взаимодействия породоразрушающего инструмента при расширении пилотной скважины с разбуриваемыми грунтами. Описан механизм образования уступов, изменяющих эффективный диаметр построенного ствола скважины и приводящих к увеличению тяговых усилий при протаскивании трубопровода в скважину.

Материалы и методы

Геометрические построения взаимодействия бурового инструмента и разбуриваемых грунтов.

Ключевые слова

подводный переход, наклонно-направленное бурение, магистральный трубопровод, геометрия и конструкция породоразрушающего инструмента, литологические границы, азимут падения, азимут скважины

В технологии строительства переходов трубопроводов через естественные и искусственные преграды методом наклонно направленного бурения (ННБ) необходимо пробурить скважину большого диаметра (до 1800 мм), для протаскивания в нее джюкера. Выполнение буровых работ связано с решением сложных технических вопросов по стабилизации ствола скважины, удержанию геометрических параметров скважины в проектных размерах, обеспечению выноса выбуренного шлама, или его распределению в стволе скважины для успешного завершения строительства трубопровода [1].

В процессе строительства скважины необходимо уделять значительное внимание пространственному положению бурового инструмента, особенно при прохождении границ геологических элементов. Это связано с тем, что траектория скважины определяется взаимоотношениями между тягово-толкающими усилиями, реализуемыми буровой установкой, прочностью пород, площадью взаимодействия породоразрушающего инструмента (расширителя) с породой, механической скоростью бурения при прохождении границ геологических элементов, веса бурового и породоразрушающего инструмента (расширителя и буровых труб) и т.д.

Механическая скорость бурения в свою очередь зависит от многих факторов, таких как: скорость подачи бурового инструмента и реализуемых силовых параметров в процессе бурения, реологических свойств бурового раствора, типа применяемого расширителя и т.д. [2]. Все указанные параметры должны быть взаимосвязаны с конструкцией породоразрушающего инструмента и прочностными свойствами проходимых пород.

Изучение вопросов, связанных с геометрией и конструкцией породоразрушающего инструмента, а также геологических границ на траектории ствола скважины позволит избежать осложнений и аварий в строительстве подводных переходов, выполняемых методом наклонно-направленного бурения.

Влияние изменений в пространственном положении ствола скважин на результаты строительства подводных переходов

Одной из основных проблем, возникающих при бурении скважин большого диаметра, является изменение пространственных размеров ствола. Причины нарушения геометрии скважин могут быть разными и они такие же, как и при бурении глубоких скважин на нефть и газ [3], но усугублены диаметром разрабатываемой скважины. При нарушениях геометрии скважины меняется эффективное проходное сечение скважины, что приводит к силовому взаимодействию между

протаскиваемым трубопроводом и стенками скважины, сопровождающееся увеличением тяговых усилий, нарушению изоляции трубопровода, а в некоторых случаях к аварийным ситуациям с заклиниванием джюкера.

В строительстве переходов возникали аварийные ситуации, связанные с неоднородностью геологического разреза. Так, в 2002 году, при строительстве перехода магистрального нефтепровода Сургут – Полоцк через реку Ока, на этапе расширения происходили заклинивания и затяжки расширителей, сопровождавшиеся сломом бурового инструмента. Геологический разрез перехода через р. Ока представлен чередованием суглинков, супесей, глин, песка, ангидритов, гипсов и доломитов различной твердости. Дополнительные затраты рабочего времени на ликвидацию последствий аварий привели к увеличению сроков строительства подводного перехода. Строительство перехода, в конечном итоге, было завершено траншейным методом, при этом затраты подрядной организации на строительство перехода были компенсированы только частично.

При строительстве перехода магистрального нефтепровода Сургут – Полоцк через р. Улейма в 2004 году наблюдались заклинивания расширителей в интервалах прохождения геологических границ. Заклинивание джюкера при протаскивании произошло в 120 м от точки выхода джюкера, на дистанции 410 м от входа джюкера в скважину. Строительство перехода завершено траншейным способом от точки заклинивания джюкера (рис. 1). Подрядная организация понесла дополнительные затраты на разработку котлована глубиной более 6 м и завершение работ траншейным способом.

Подобное техническое осложнение возникло и при строительстве подводного перехода через р. Белая нефтепровода УБКУА, выполненного в 2017 г с применением технологии цементации гравелистых грунтов. Цементирование гравелистых грунтов проводилось с применением технологии струйной цементации [4]. Произведено 4 попытки протаскивания джюкера в скважину. Каждая попытка сопровождалась повышением тяговых усилий. После извлечения джюкера зафиксированы повреждения изоляции джюкера по окружности трубы в секторе $\sim 260^\circ \leftrightarrow 20^\circ$ по направлению протаскивания (рис. 2), свидетельствующие о нарушенной геометрии ствола скважины. Заказчик и подрядная организация понесли дополнительные затраты на проектирование и строительство нового створа, на привлечение дополнительных человеческих ресурсов и оборудования.

Таким образом, отклонения пространственного положения скважины от проектного

положения, создают дополнительные сопротивления, вызванные взаимодействием протаскиваемого трубопровода со стенками скважины, приводящие к увеличению тяговых усилий и нарушению изоляции трубопровода. Для предотвращения подобных технических проблем, необходимо изучать условия и особенности работы бурового инструмента в строительстве горизонтальных скважин большого диаметра при сооружении подводных переходов магистральных трубопроводов.

Особенности механики работы бурового инструмента в скважине большого диаметра

Детализуем отдельные элементы взаимодействия породоразрушающего инструмента при прохождении грунтов, различающихся по прочности. Рассмотрим работу расширителя при прохождении через границу твердых и мягких грунтов (рис. 3, 4).

При наличии на участке траектории ствола скважины литологической или геологической границы, например, перехода из мягкой породы (глины, пески, гравелистые грунты) в твердые грунты (известняки, аргиллиты), расширитель, двигаясь в разбуренной до промежуточного диаметра скважине, соприкасается с твердой породой в точке контакта расширителя с литологической границей и начинает скользить по границе с твердыми грунтами. Не оптимально реализуемые параметры бурения (скорость подачи каретки, скорость вращения), нерациональное размещение и количество разрушающих элементов на расширителе, не оптимизированная компоновка бурового инструмента, отсутствие центраторов в компоновке бурового инструмента приведет к изменению траектории ствола скважины от проектных значений.

Чаще всего, причина изменения траектории ствола расширенной скважины заключается в отсутствии породоразрушающих элементов в точке контакта расширителя с породой, их недостаточное количество или нерациональное размещение, осуществляемое без учета геометрических параметров и сил, действующих в месте контакта. Но даже при наличии правильно подобранного вооружения и конструкции породоразрушающего инструмента увеличение тягово-толкающих усилий приводит к скольжению расширителя по границе геологических разностей, сопровождаемому увеличением крутящего момента во время прижимания компоновки рабочих элементов буровой колонны к своду скважины вследствие возрастания сил трения и реакции от твердой поверхности.

Распределение векторов сил при прохождении расширителем интервала, характеризующегося переходом из мягких пород в твердые, показано на рис. 4. На расширитель действуют: вес инструмента — G , тягово-толкающее усилие — F , реакция опоры N_1, N_2 :

$$\vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{G} + \vec{F} = \vec{F}_{общ}, \quad (1)$$

где N_1 — реакция опоры твердых грунтов, N_2 — реакция опоры мягких грунтов. Сумма векторов всех приложенных к расширителю усилий равна $F_{общ}$.

При прохождении расширителем литологической границы в направлении от твердых грунтов к мягким (рис. 5, 6), также меняется пространственное положение ствола



Рис. 1 — Вскрытая часть геологического разреза подводного перехода магистрального нефтепровода Сургут – Полоцк через р. Улейма в месте остановки джюкера при протаскивании

Fig. 1 — The dig-out part of underwater crossing of the pipeline through the Uleyma river at the place where the pipeline is stopped while pulling



Рис. 2 — Нарушение изоляции трубопровода при нарушенной геометрии ствола скважины

Fig. 2 — Damaged insulation of the pipeline in the case of the well shaft geometry damage

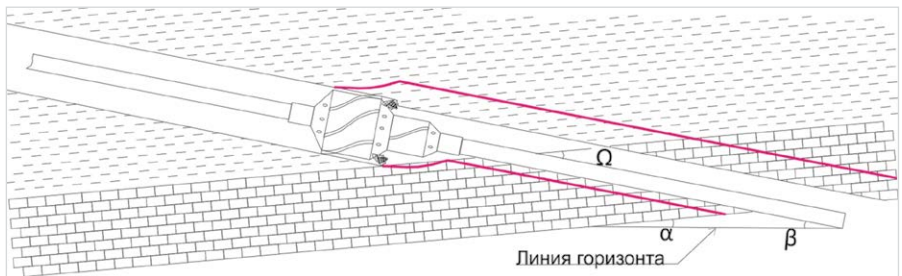


Рис. 3 — Изменение траектории ствола скважины при прохождении границ с разными физико-механическими свойствами грунтов (из менее прочных грунтов в более прочные)

Fig. 3 — Change in the well shaft path when passing through the boundaries with different physical and mechanical properties of soils (from less strong soils into stronger soils)

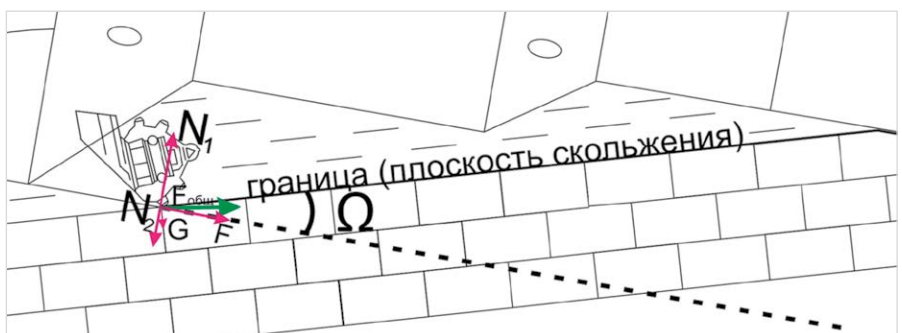


Рис. 4 — Схема действующих сил при прохождении расширителем границы пород из мягких в твердые

Fig. 4 — Diagram of acting forces when the boring head passes the boundaries of rocks from soft to hard

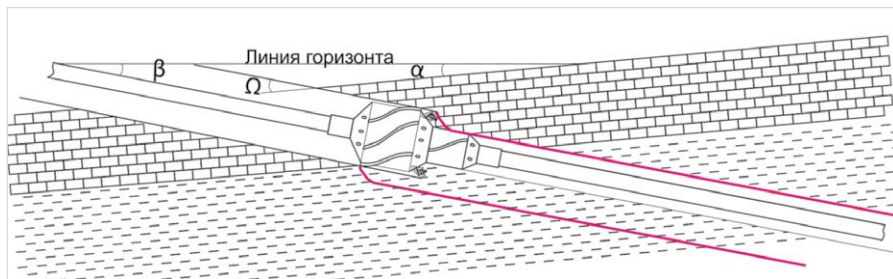


Рис. 5 — Изменение траектории ствола скважины при прохождении границ с разными физико-механическими свойствами грунтов (из более прочных грунтов в менее прочные)

Fig. 5 — Change in the well shaft path when passing the boundaries with different physical and mechanical properties of soils (from stronger soils to less strong soils)

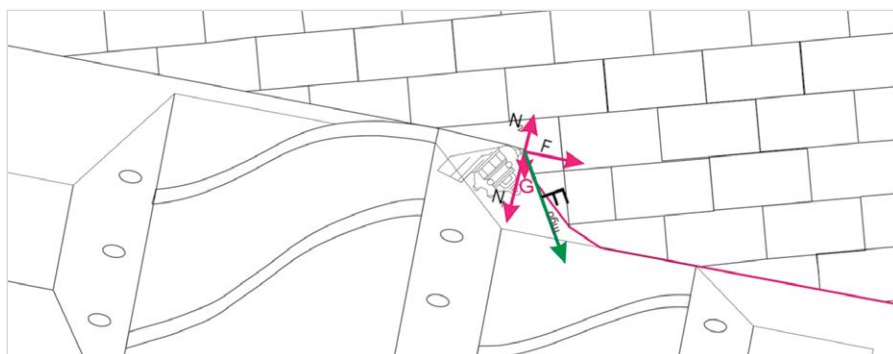


Рис. 6 — Схема действующих сил при прохождении расширителем границы пород из твердых в мягкие

Fig. 6 — Diagram of acting forces when the boring head passes the boundaries of rocks from hard to soft

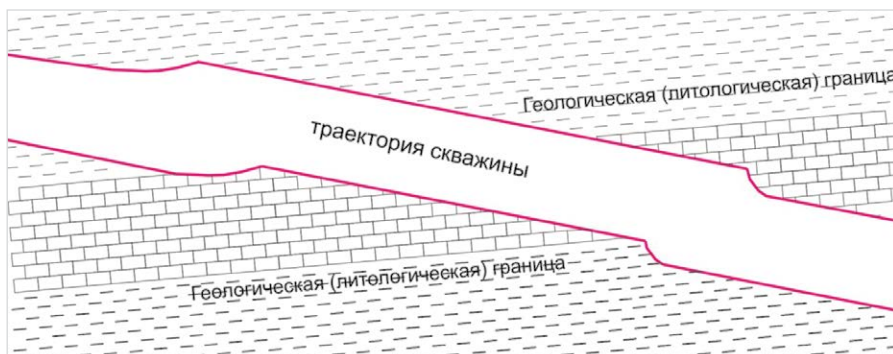


Рис. 7 — Траектория расширенной скважины на границе изменения литологии пород по оси скважины

Fig. 7 — Expanded well path on the boundary where rock lithology changes on the well axis

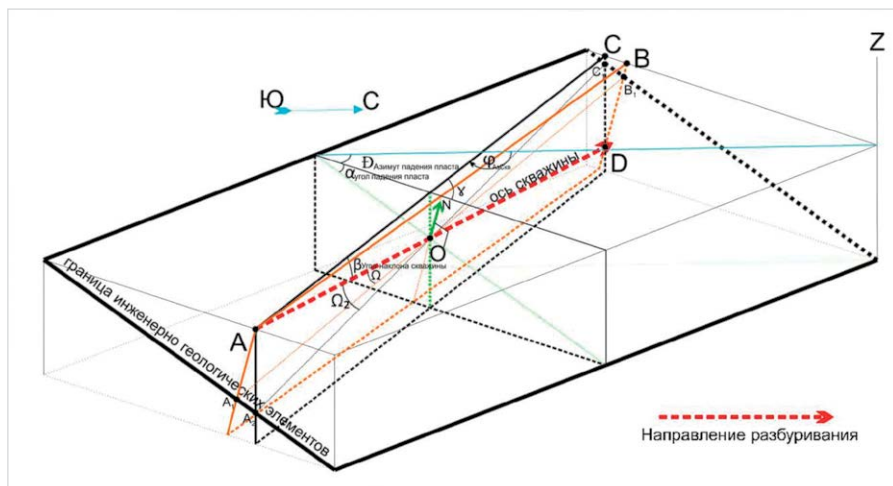


Рис. 8 — Пространственная схема для прогноза траектории скважины

Fig. 8 — Spatial schematic for the forecasting of well path

скважины. При выходе расширителя из твердых пород в мягкие, в верхней точке соприкосновения расширителя с литологической границей образуется уступ. Распределение векторов сил показано на рис. 6.

В конечном итоге расширенная скважина на участке прохождения литологической границы выглядит так, как показано на рис. 7. Расширенная скважина осложняется 2-мя уступами.

Условием, при котором траектория скважины не будет отклоняться от заданного проектного направления, является параллельность общего вектора действующих на расширитель сил с осью скважины

$$\vec{F}_{общ} \parallel \vec{F}, \quad (2)$$

или

$$\vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{G} + \vec{F} \parallel \vec{F}. \quad (3)$$

Для достижения условия совпадения направления суммарных приложенных сил необходимо выполнение условия

$$\vec{N}_1 = -\vec{N}_2. \quad (4)$$

При этом реакция опоры N_1 и N_2 зависит от приложенной силы F , согласно законам механики, чем больше приложенная сила F , тем больше реакция опоры.

Выполнение условия (3) реализуется, при условии равенства N_1 и N_2 в случае, когда расширитель движется в однородной среде. На буровой инструмент действует сила от веса самого инструмента G , которая, впрочем, частично компенсируется изменением направления вектора приложенных тягово-толкающих усилий. Как правило, при расширении скважины применяется метод «на себя», и в этом случае точка приложения тягового усилия расположена в точке выхода расширителя на поверхность земли. Вектор приложенных усилий будет всегда направлен в сторону точки выхода бурового инструмента, чем и компенсируется действие сил гравитации на буровой инструмент.

Необходимо отметить, что на рис. 7 показан случай, когда азимут падения пластов совпадает с азимутом горизонтальной проекции скважины. В этом случае двумерный чертеж показывает конфигурацию скважины без искажений. В случае несовпадения азимута падения пластов и азимута вертикальной проекции скважины, двумерный чертеж будет искажать ее реальную конфигурацию. Поэтому необходимо проводить трехмерные построения для определения поведения траектории скважины в пространстве.

Наличие литологических границ на пути траектории скважины является одним из факторов, приводящих к нарушению геометрии ее ствола и осложнению для протаскивания джюкера. Знания механизма образования уступов помогут при конструировании геометрических размеров расширителей, расположения породоразрушающих элементов на их корпусе, а также в подборе элементов компоновки буровой колонны, что обеспечит ее жесткость при прохождении литологических границ.

Понимание физических процессов, происходящих при прохождении буровым инструментом литологических границ, имеет

практическое значение для операторов буровой установки для прогнозирования и предотвращения заклиниваний бурового инструмента, контроля траектории ствола скважины, а также при подборе режимов бурения и расширения скважины для протаскивания трубопровода.

Влияние пространственного ориентирования границ грунта на изменение траектории скважины

Схему определения углов взаимодействия породоразрушающего инструмента и структурно-геологических элементов можно понять из рис. 8.

Основными элементами геометрических параметров, которые следует рассматривать при прогнозировании траектории скважины в сложных геологических условиях, при прохождении инженерно-геологических границ, являются: азимут падения пласта — D (границы пластов); угол падения пласта — α (границы пластов); проектный угол наклона ствола скважины в интервале разбуривания — β ; азимут траектории оси скважины в интервале разбуривания — ϕ ; угол встречи расширителя и разбуриваемого инженерно-геологического элемента — Ω , лежит в плоскости, образуемой осью ствола скважины и нормалью N к плоскости падения пласта. Нормаль N к плоскости литологической границы — N , необходимо учитывать при определении векторов сил, действующих при разбуривании. Нормаль N лежит в плоскости, образуемой линией падения пласта (литологическая граница пластов). Угол встречи расширителя с геологической границей — Ω , необходимо принимать во внимание при размещении породоразрушающих элементов на корпусе расширителя.

На рис. 8 схематично представлен объем грунта с элементом литологической границы. Плоскость границы задается углом падения пласта α и азимутом падения пласта D . Азимуты падения пласта и азимут скважины определяются от направления Север — Юг. Пунктирная прямая AD схематично показывает наклонную скважину, пробуренную для дальнейшего расширения до проектного диаметра и последующего протаскивания дюкера. На вертикальной плоскости ACD угол наклона скважины обозначен β . Азимут скважины — ϕ . В плоскости ACD угол встречи скважины с литологической границей Ω_2 будет зависеть от азимутов скважины ϕ и падения пласта D .

Для понимания практического применения этой схемы допустим, что точка пересечения скважины и пласта неизменна и что углы падения пластов и наклона скважины равны друг другу, $\alpha = \beta$. В этом случае, если азимут скважины совпадает с азимутом падения пласта, ось скважины параллельна падению пласта, и в идеале, граница служит направляющей для бурового инструмента. В случае если направление азимутов D и ϕ будут противоположны друг другу, то угол встречи будет равен сумме $\alpha + \beta$ или 2α .

При несовпадении азимутов D и ϕ угол Ω_2 необходимо определять в зависимости от угла между направлением скважины и направлением падения пласта — γ .

В случае, если γ лежит между 0° и 180° :

$$\Omega_2 = \beta + \alpha * (\gamma / 90 - 1). \quad (5)$$

В случае, если γ лежит между 180° и 360° :

$$\Omega_2 = \beta + \alpha * (3 - \gamma / 90), \quad (6)$$

где Ω_2 — угол встречи расширителя с литологической границей в вертикальной плоскости.

Положительное значение Ω_2 говорит о расположении точки контакта бурового инструмента с литологической границей над ее плоскостью, отрицательное значение свидетельствует о расположении точки контакта под плоскостью литологической границы. Но для целей повышения эффективности породоразрушающих элементов, размещаемых на расширителе, в точке контакта с литологической границей необходимо использовать угол Ω .

На рис. 9 показано положение расширителя и литологической границы в вертикальной плоскости по направлению падения пласта. Реакция от опоры в точке O пересечения ствола скважины и литологической границы будет направлена по нормали N к литологической границе. Действие сил переходит в плоскость ADB (рис. 8) и реальный угол встречи расширителя с литологической границей Ω , отличается от Ω_2 , лежащего в вертикальной плоскости.



Рис. 9 — Схема взаимодействия расширителя с породой на литологической границе

Fig. 9 — Diagram of interaction between the boring head and the rock on the lithologic boundary

При выборе расширителя в зависимости от горно-геологических условий, диаметра прокладываемого трубопровода, типа применяемой буровой установки, бурового оборудования, инструмента и технологии расширения [5], необходимо обращать внимание также на значение реального угла встречи бурового инструмента (расширителя) с границами инженерно-геологических элементов.

Геометрические параметры взаимодействия расширителя с разбуриваемым грунтом на границах инженерно-геологических элементов необходимо принимать во внимание при моделировании работы расширителя с последующей расстановкой породоразрушающих элементов на его корпусе для повышения эффективности буровых работ.

Вычисление реального угла и расстановка породоразрушающих элементов на корпусе расширителя в этой статье не рассматриваются.

Итоги

Выполненный анализ технологии строительства переходов методом ННБ показал, что во избежание возникновения уступов в процессе формирования ствола скважины необходимо выполнять некоторые предписания. А именно — проектировать конструкцию расширителя, место установки центров в компоновке буровой колонны, оснащения расширителя вооружением, опираясь на силовые элементы взаимодействия бурового инструмента с проходными грунтами, а также учитывая реальный угол взаимодействия расширителя и границы пород с различными физико-механическими свойствами.

При проведении инженерно-геологических изысканий необходимо обращать внимание на размещение геологических скважин для определения структурных элементов залегания горных пород по оси проектируемого перехода. На сегодняшний день правила проведения инженерно-геологических изысканий не нормируют требования по определению элементов залегания литологических границ.

Выводы

Изучение вопросов взаимодействия бурового инструмента с разбуриваемой породой на литологических границах позволит избежать изменение траектории скважины для протаскивания трубопровода и уменьшить вероятность возникновения аварий при строительстве переходов магистральных трубопроводов через естественные и искусственные препятствия.

Список литературы

1. Шарафутдинов З.З., Спектор Ю.И., Скрепнюк А.Б., Парижер В.И., Сорокин Д.Н. Строительство переходов магистральных трубопроводов через естественные и искусственные препятствия. Новосибирск: Наука, 2013. 338 с.
2. Лисин Ю.В., Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З. Эффективность применения расширителей при строительстве подводных переходов методом наклонно-направленного бурения // Экспозиция Нефть Газ. 2017. №6. С. 32–36.
3. Попов А.Н., Спивак А.И., Акбулатов Т.О., Мавлютов М.Р. и др. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 2003. 509 с.
4. Малинин А. Г., Малинин П.А. Цементация грунтов при строительстве наклонного ствола в зоне четвертичных отложений // Метро и тоннели. 2007. №2. С. 35–37.
5. Шарафутдинов З.З., Комаров А.И., Голофаст С.Л. Расширение пилотной скважины в строительстве подводных переходов трубопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2016. № 5. С. 32–40.



СЕМИНАР- КОНФЕРЕНЦИЯ

04–08 июня 2018

«Инновационные решения
в области КРС, ПНП, ГНКТ,
внутрискважинные работы
и супервайзинг
в горизонтальных и
разветвленных скважинах»



Иновационные
Технологии

+7 (3452) 534 009

togc@bk.ru, in_tech@bk.ru

WWW.TOGC.INFO

ЭКСПОЗИЦИЯ
НЕФТЬ ГАЗ

Генеральный информационный партнер

Formation of the wellbore at the boundary of engineering-geological elements in the implementation of the HDD method in the construction of an underwater crossing

Author:

Rim A. Kapaev — chief specialist of the support department for design and survey works;
KapaevRA@ak.transneft.ru

PJSC "Transneft", Moscow, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the study of the problems of changing the trajectory of the wellbore at the boundary of the change in the physical and mechanical properties of the drilled soils during the construction of the main pipelines by the method of directional drilling. The article discusses the interaction of the rock cutting tool with the extension of the pilot well with the drillable soils and describes the mechanism of formation of the ledges in the borehole that change the effective diameter of the constructed wellbore and lead to an increase in traction forces while dragging the pipeline into the well.

Materials and methods

Geometric construction of the interaction between drilling tools and drillable soils.

Results

To avoid the occurrence of ledges in the borehole during the drilling of the wellbore, it is necessary to design the expander design, the location of the centralizers in the assembly of the drill string, equipping the expander with armament, relying on the force elements of the interaction of the drilling tool with the passable soils, and also taking into account the actual angle of interaction between the expander and

the rock boundary with various mechanical properties.

When carrying out engineering and geological surveys, it is necessary to pay attention to the placement of geological wells to determine the structural elements of occurrence of rocks along the axis of the projected transition. To date, the rules for engineering and geological surveys do not standardize the requirements for determining the elements of occurrence of lithological boundaries.

Conclusions

The study of the interaction of the drilling tool with the drilled rock at the lithological boundaries will avoid changing the well trajectory for pulling the pipeline and reduce the likelihood of accidents during the construction of pipeline crossings through natural and artificial obstacles.

Keywords

submerged crossing,
directional drilling,
mainline pipeline,
geometry and design of the rock-cutting tool,
lithological boundaries,
destruction of pipeline insulation,
well trajectory, dip azimuth,
azimuth of well direction

References

1. Sharafutdinov Z.Z., Spektor, Yu.I., Skrepnuyk A.B., Parizher V.I., Sorokin D.N. *Stroitel'stvo perekhodov magistral'nykh truboprovodov cherez estestvennye i iskusstvennye prepyatstviya* [Construction of crossings of trunk pipelines through natural and artificial obstacles]. Novosibirsk: *Nauka*, 2013, 338 p.
2. Lisin Yu.V., Sapsay A.N., Sharafutdinov Z.Z. *Effektivnost' primeneniya rasshriteley pri stroitel'stve podvodnykh perekhodov metodom naklonno napravlennogo bureniya* [Efficiency of reamers in the course of underwater passage construction by directional drilling]. *Exposition Oil Gas*, 2017, issue 6, pp. 32–36.
3. Popov A.N., Spivak A.I., Akbulatov T.O., Mavlytov M.R. etc. *Tekhnologiya bureniya neftnykh i gazovykh skvazhin* [Technology of drilling oil and gas wells]. Moscow: *Nedra*, 2003, 509 p.
4. Malinin A. G., Malinin P.A. *Tsementatsiya gruntov pri stroitel'stve naklonnogo stvola v zone chetvertichnykh otlozheniy* [Cementation of soils during the construction of an inclined shaft in the zone of Quaternary sediments]. *Metro i tonneli*, 2007, issue 2, pp.35–37.
5. Sharafutdinov Z.Z., Komarov A.I., Golofast S.I. *Rasshirenie pilotnoy skvazhiny v stroitel'stve podvodnykh perekhodov truboprovodov* [Increasing the diameter of a pilot well in the construction of underwater pipeline crossings]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*, 2016, issue5, pp.32–40.