

Геомеханическое моделирование для анализа технологий ННБ, реализуемых при строительстве подводных переходов

Д.Р. Вафин

научный сотрудник лаборатории линейной части и подводных переходов¹

VafinDR@niitnn.transneft.ru

А.Н. Сапсай

вице-президент²

Ю.В. Лисин

д.т.н., генеральный директор¹

Р.А. Капаев

главный специалист отдела сопровождения ПИР объектов ТПР и КР²

KapaevRA@ak.transneft.ru

Д.А. Шаталов

к.т.н., заместитель заведующего лабораторией линейной части и подводных переходов¹

ShatalovDA@niitnn.transneft.ru

¹ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

²ПАО «Транснефть», Москва, Россия

В статье рассмотрены технико-технологические решения, применяемые в наклонно направленном бурении, а также их влияние на процесс строительства подводного перехода. В качестве примера рассмотрен процесс развития аварийной ситуации при прохождении гравийно-галечниковых грунтов. На основании моделирования напряженно-деформированного состояния грунтов, слагающих ствол скважины, и гидродинамической модели процессов фильтрации бурового раствора проанализированы технологические ошибки, способствующие возникновению аварийных ситуаций.

Материалы и методы

Построение геомеханической и гидродинамической моделей подводного перехода.

Ключевые слова

подводный переход, наклонно направленное бурение, обрушение ствола скважины, буровой раствор, магистральный трубопровод, геомеханическая модель

Залогом успешного строительства подводного перехода методом наклонно направленного бурения служит создание скважины, являющейся надежным каналом для протаскивания трубопровода. Это сложная инженерно-техническая задача, процесс реализации которой может сопровождаться появлением технологических ошибок. Во многом это обусловлено тем, что не учитываются силы, действующие в грунтах, взаимное влияние вскрываемого грунта, бурового инструмента и применяемого раствора. В подобных условиях стандартные технические подходы, использующие результаты инженерных изысканий, не позволяют в необходимой мере произвести оценку условий строительства.

При разработке проектной и рабочей документации на строительство подводного перехода необходимо проведение инженерно-технической оценки влияния горно-геологических условий на процесс строительства. Подобная оценка должна проводиться на основе учета сил и напряжений, действующих на стенках скважины при протаскивании трубопровода в неустойчивых грунтах.

Процесс появления осложнений и развития аварийной ситуации в ходе строительства подводного перехода изучен на основе существующего положительного и отрицательного опыта строительства скважин подводных переходов. В качестве инструментов для анализа применявшихся технических решений использовались результаты построения геомеханической и гидродинамической моделей для процесса строительства подводного перехода. При построении моделей учитывались свойства залегающих грунтов, их взаимодействие с буровым раствором и влияние на состояние грунтов технологических параметров бурового раствора.

Объект исследования

Для разработки геомеханической модели подводного перехода приняты данные подводного перехода магистрального трубопровода, построенного методом наклонно направленного бурения через реку шириной 350 м, глубиной 7 м. Длина пилотной скважины от точки входа до точки выхода бурового инструмента принята 770 м, с учетом запаса на криволинейность скважины в вертикальной плоскости. Углы входа и выхода скважины приняты 6°, радиус трассировки — 1700 м, диаметр скважины — 1600 мм. Профиль модели подводного перехода представлен на рис. 1.

В пределах участка строительства принят следующий состав грунтов: суглинок полутвердый с прослойками песка и включениями гравия; суглинок тугопластичный с включениями гравия; суглинок мягкопластичный с прослойками текучепластичного

суглинка, песка мелкого с включениями гравия; глина полутвердая с прослойками песка; глина тугопластичная; песок мелкий с прослойками суглинка и глины; песок гравелистый с прослойками суглинка, глины, с включениями дресвы; гравийный грунт с прослойками песка, глины и суглинка; гипс средней прочности.

Результаты применяемой технологии строительства

Для строительства скважины подводного перехода принята установка для наклонно направленного бурения с максимально развиваемым тяговым усилием 450 тс, крутящим моментом — 150 кНм. Технические параметры бурения пилотной скважины, расширения и калибровки для модели подводного перехода были приняты на основе опыта строительства переходов в схожих геологических условиях и приведены в таб. 1.

При проведении операции по протаскиванию трубопровода в интервале 150–170 м происходил рост тяговых нагрузок на более чем 50 тс, что соответствует началу криволинейного участка и протаскиванию в гравелистых песках. На отметке 211 м тяговые усилия буровой установки достигают 180 тс, крутящий момент — 43 кНм. В связи с превышением расчетных усилий работы по протаскиванию трубопровода останавливаются на отметке 249 м. Тяговые усилия составили 235 тс, крутящий момент — 45 кНм. Изменение тяговых усилий при протаскивании трубопровода представлено на рис. 2. Над местом остановки трубопровода на поверхности земли образуются воронки глубиной до 1 м и диаметром до 4 м.

Рассмотренная ситуация соответствует условиям обрушения стенок скважины подводного перехода, сложенных несцементированными грунтами, при проведении операции по протаскиванию трубопровода.

Геомеханическое моделирование подводного перехода

С целью установления причин обрушения ствола скважины на исследуемом подводном переходе рассмотрим изменение напряженно-деформированного состояния грунтов в месте остановки трубопровода.

При формировании пилотного ствола скважины происходит нарушение естественного напряженного состояния грунтов. Роль и влияние напряжений, действующих на свободной поверхности скважины, усиливается по мере увеличения диаметра скважины.

Для определения упругого состояния горной породы и предупреждения открытых поглощений (гидроразрыва) при бурении и заканчивании вертикальных, горизонтальных и наклонных нефтяных и газовых

скважин применяется методика, разработанная УГНТУ, г. Уфа [1].

Используя данную методику для горизонтальных и наклонно направленных скважин большого диаметра на переходах через естественные и искусственные препятствия магистральных трубопроводов, становится возможным определить напряженное состояние грунтов, слагающих ствол скважины, их устойчивое состояние и давление гидроразрыва грунта.

Предельное касательное напряжение грунта характеризуется силами связи между слагающими его минералами и частицами и определяется в соответствии с теорией прочности Мора – Кулона:

$$\tau_n = \tau_{co} + \sigma_n \cdot \tan \varphi,$$

где τ_n – предельное касательное напряжение грунта, МПа; τ_{co} – коэффициент сцепления, соответствующий величине предельного касательного напряжения при $\sigma_n = 0$, МПа; σ_n – нормальное напряжение, МПа; φ – угол внутреннего трения, град.

Для несвязных грунтов, таких как песок, гравий и галечник, угол внутреннего трения зависит от плотности упаковки грунта, то есть от его пористости. Угол внутреннего трения повышается с увеличением плотности, количества крупных включений и уменьшением окатанности зерен грунта [2].

Удельное сцепление в несвязных грунтах имеет место при высокой плотности грунта, его малой однородности и обусловлено взаимодействием зерен [2].

Прогнозная оценка устойчивого состояния ствола скважины n определяется отношением предельного касательного напряжения грунта τ_n к максимальному касательному напряжению τ_{max} , действующему на стенке скважины.

При условии превышения τ_n над τ_{max} , то

если $n > 1$, стенка скважины находится в упругом состоянии. Если $n < 1$, то стенка скважины может деформироваться пластически или разрушиться.

Большое влияние на процесс перераспределения напряжений при бурении скважины оказывает буровой раствор. Во время бурения раствор замещает объем разбуренного грунта, оказывая давление на стенки скважины, а также активно взаимодействует со слагающим ее грунтом. Увеличение плотности бурового раствора и превышение скважинного давления над боковым горным давлением способно привести к росту растягивающих напряжений на стенке скважины. В результате образуются трещины, которые приводят к гидроразрыву, то есть к грифонообразованию или к интенсивному поглощению бурового раствора.

Прогнозная оценка возможности гидроразрыва грунта ведется из условия превышения давления, действующего в скважине, над расчетным давлением гидроразрыва грунта. В обратном случае, гидроразрыв грунта маловероятен.

С учетом вышеуказанных положений, было определено напряженно-деформированное состояние гравелистых песков и полутвердых глин в интервале остановки процесса протаскивания трубопровода на моделируемом подводном переходе.

В рассмотренном случае приняты следующие параметры грунтов:

- гравелистые пески: плотность грунта природная — 2,01 г/см³, плотность частиц грунта — 2,65 г/см³, пористость — 34%, фракции размером 0,05–10 мм составляют 92,1%. Согласно СП 22.13330.2011 [3], удельное сцепление 0,001 МПа, угол внутреннего трения — 40°.
- полутвердые глины: плотность грунта

природная — 1,89 г/см³, пористость — 47%, удельное сцепление в водонасыщенном состоянии 0,047 МПа, угол внутреннего трения — 18°.

Параметры бурового раствора: плотность — 1035 кг/м³, динамическое напряжение сдвига — 264 дПа, пластическая вязкость — 0,023 Па·с.

Анализ результатов расчетов, приведенных на рис. 3, показывает:

- предел прочности гравелистых песков составляет $\tau_n = 0,24$ МПа, при действующих напряжениях $\tau_{max} = 0,33$ МПа. Запас прочности гравелистых песков на границе их перехода в плотный грунт составляет $n = 0,7$, что является недостаточным для обеспечения устойчивого ствола скважины. Для этого интервала бурения характерны большие вертикальные напряжения (до 1 МПа), развивающиеся из-за наличия в грунте порового пространства;
- запас прочности n полутвердых глин в месте остановки трубопровода составляет 1,8;
- гидроразрыв грунтов в рассматриваемом интервале не происходит.

Таким образом, подтверждены условия возникновения обрушения гравелистых песков в интервале 150–200 м, что соответствует криволинейному участку профиля скважины. Согласно проведенным расчетам, при удельном сцеплении гравелистого песка не менее 0,05 МПа и пористости не более 15%, стенка скважины будет находиться в упругом состоянии. Это становится возможным, например, при фильтрации высокоструктурированного бурового раствора в проникаемые каналы гравелистого песка, за счет чего увеличивается площадь контакта между частицами грунта, и снижается объем открытого порового пространства. Рассмотрим условия реализации подобного технологического подхода к строительству подводного перехода.

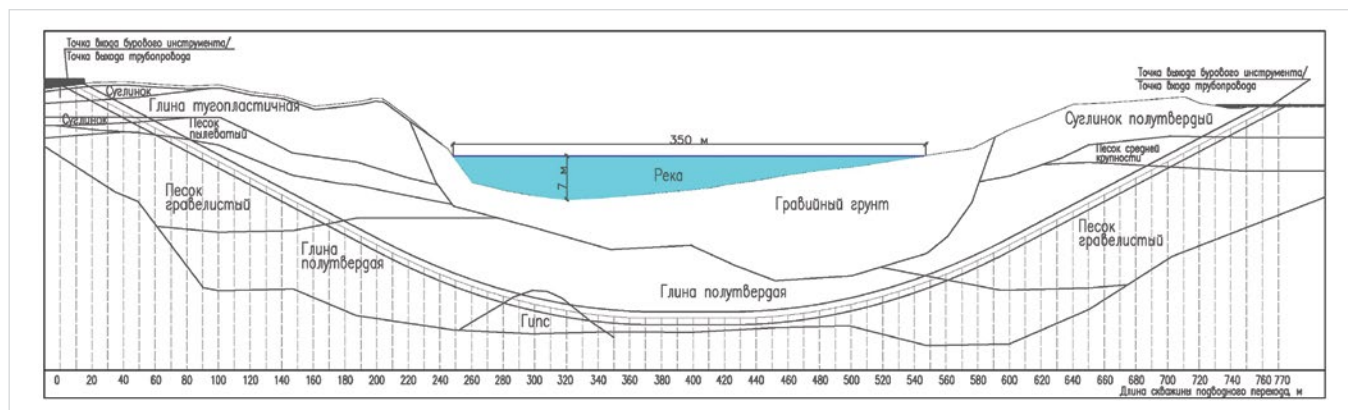


Рис. 1 — Профиль модели подводного перехода
Fig. 1 — Underwater passage model profile

Вид операции	Техническая скорость, м/ст.-сут.	Коммерческая скорость, м/ст.-сут.	Время работ, сут.	Остановки во время операции, сут.
Бурение пилотной скважины	188	106	7,3	3,2 сут.
Расширение 400–1600 мм с шагом 200 мм	30	29	25,9	0,4 сут.
Калибровка 1600 мм	2860	2860	0,3	-

Таб. 1 — Технические параметры бурения пилотной скважины, расширения и калибровки
Tab. 1 — Drilling, reaming and conditioning parameters of the pilot bore

¹При проведении расчетов следует учитывать, что в глинистых отложениях с различной степенью пластичности пористость равна нулю, так как вода является одним из компонентов глины, определяет ее состояние и поведение. При проведении расчетов для несцементированных отложений расчет осуществляется для исходного состояния и условия заполнения его буровым раствором.

Гидродинамическое моделирование взаимодействия бурового раствора с несцементированными грунтами

По классификации [4] буровые растворы, применяемые при бурении, относятся к вязкопластичным с выраженными тиксотропными свойствами, которые обусловлены применением высококоллоидных глин на основе натриевого монтмориллонита и низким содержанием электролитов. В практической деятельности для обеспечения кольматации проницаемых грунтов нередко применяются буровые растворы, состоящие из модифицированного глинопорошка низкого качества на основе гидрослюдастых глин с меньшим выходом раствора.

При одинаковой концентрации, в зависимости от вида глинопорошка, применяемого для получения бурового раствора, вязкость раствора меняется в широких пределах. Диапазон изменения свойств бурового раствора зависит от качества применяемой глины, ее коллоидных свойств, длительности гидратации, степени перемешивания, наличия электролитов, органических добавок. Влияние этих факторов затрудняет определение критериев фильтрации бурового раствора в пористую среду.

Основными реологическими параметрами, которые характеризуют буровой раствор, являются: динамическое напряжение сдвига, пластическая вязкость и их производная — коэффициент пластичности.

Динамическое напряжение сдвига (далее ДНС) характеризует прочностное сопротивление бурового раствора течению и обусловлено прочностью водородных связей и индукционным периодом их образования. Величина пластической вязкости (далее ПВ) характеризует способность дисперсной среды уплотняться. Коэффициент

пластичности (далее КП) представляет собой отношение предельного динамического напряжения сдвига к пластической вязкости. Поэтому коэффициент пластичности отражает прочность взаимосвязей между компонентами раствора в процессе движения и является физической характеристикой прочности и скорости восстановления связей в структуре раствора.

Возможность прохождения процесса фильтрации бурового раствора в пористую среду определяется соотношением размера проницаемого канала (D_k) к размеру частиц бурового раствора (D_p) и градиентом давления между скважиной и пластом:

- при $D_k/D_p < 1$ фильтрация бурового раствора не происходит;
- при $1 < D_k/D_p < 6$ фильтрация бурового раствора происходит с заполнением прискважинного порового пространства грунта, то есть с образованием зоны кольматации;
- при $D_k/D_p \geq 6$ глубина фильтрации определяется состоянием связей в структуре раствора и градиентом давления между скважиной и пластом.

Анализ результатов исследований [5, 6] процесса фильтрации технологических растворов в образцы из песка различного фракционного состава показал, что с градиентом 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 c^{-1} (рис. 4). Для образцов из мелкого песка с эффективным диаметром частиц 0,142 мм необходимая для этого величина ДНС составила 120 дПа, ПВ составила 15 мПа·с. Для фильтрации в пористую среду с большим эффективным диаметром частиц необходимо повышение ДНС бурового раствора.

Опыт строительства подводных

переходов методом наклонно направленного бурения, характеризующихся наличием гравелистых песков и гравийно-галечниковых грунтов, показывает, что для фильтрации бурового раствора с целью закрепления стенок скважины динамическое напряжение сдвига должно составлять от 400 до 600 дПа.

На основании проведенных исследований и опыта строительства наклонно направленных скважин большого диаметра определены граничные значения прохождения фильтрации бурового раствора с упрочнением пористой среды: соотношение размера проницаемого канала к размеру частиц бурового раствора (D_k/D_p) больше 6, динамическое напряжение сдвига не менее 300 дПа, коэффициент пластичности не менее 1300 c^{-1} . Данные значения коэффициента пластичности позволяют сократить интервал неконтролируемой фильтрации бурового раствора в проницаемый грунт в процессе его разбуривания.

В модели подводного перехода, являющейся объектом исследования процессов бурения, применяется модифицированный кальциевый бентонитовый порошок на основе гидрослюдастых глин с размером диспергированных частиц 0,04 мм [7]. Суспензии с 8%-ной концентрацией модифицированного кальцевого бентонита обладают следующими показателями: ПВ = 0,024 Па·с, ДНС = 288 дПа, КП = 1200 c^{-1} .

При сопоставлении результатов исследования фильтрации бурового раствора с условиями строительства смоделированного подводного перехода было определено соотношение размера проницаемого канала гравелистого песка к размеру частиц бурового раствора (D_k/D_p), которое составило 8,15. Фильтрация бурового раствора в проницаемые каналы гравелистого

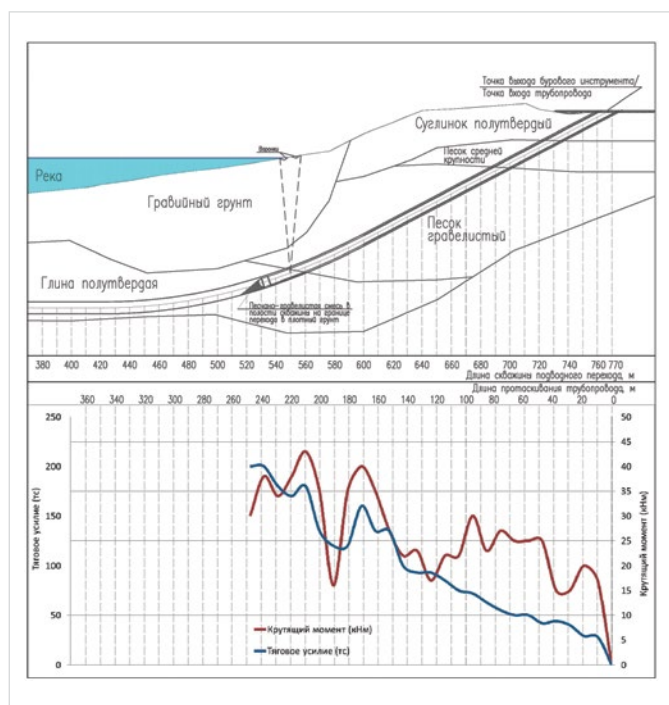


Рис. 2 — Изменение тяговых усилий и крутящего момента при протаскивании трубопровода

Fig. 2 — Changes in pulling capacity and torque when dragging through a pipeline

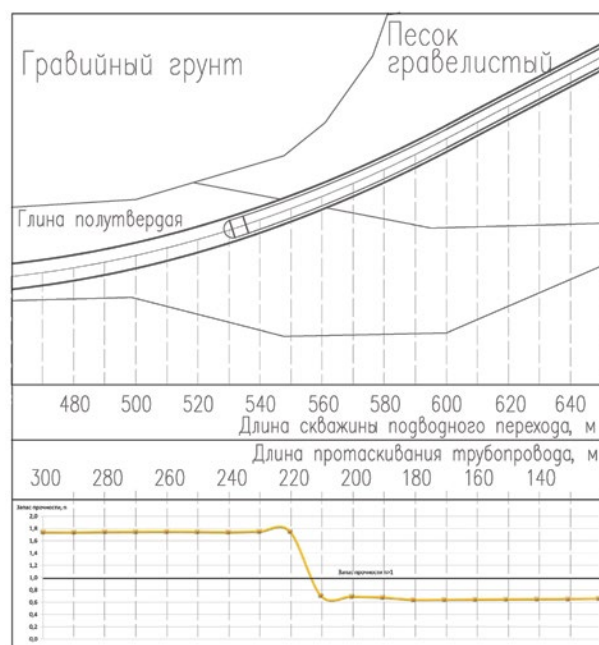


Рис. 3 — Запас прочности при протаскивании трубопровода

Fig. 3 — Soil strength margin while dragging through a pipeline

песка составила от 13 до 55 см. Поскольку параметры бурового раствора не соответствуют условиям прохождения фильтрации раствора с закреплением порового пространства грунта (требуется ДНС 400 дПа, КП 1300 с⁻¹, ПВ 0,030 Па•с), то и устойчивый канал для протаскивания трубопровода в зоне залегания неустойчивых грунтов не был создан.

Выносная способность бурового раствора определяется разностью величин ДНС, необходимого для предотвращения падения частиц шлама, и скоростного напора бурового раствора в скважине. Из условия примененного бурового раствора и параметров промывки ствола скважины максимальный размер частиц выбуренной породы, который способен вынести

буровой раствор, составляет 10–11 мм. По гранулометрическому составу гравелистые пески состоят на 7,9% из фракций размером более 10 мм, вышележащие гравийно-галечниковые грунты состоят из фракций размером более 10 мм на 27%. Галечниковые отложения не будут выноситься на поверхность, создавая неравномерно распределенные нагромождения по длине скважины. Для взвешивания и выноса крупных частиц необходимо применять растворы с более высокими показателями τ_0 . Как свидетельствует опыт строительства, фракции размером 20–40 мм не выносятся буровым раствором из скважины.

Отсутствие выноса гравийно-галечникового грунта из скважины приведет к его накоплению на нижней образующей ствола скважины в виде гравийных подушек (дюн). Контакт протаскиваемого трубопровода с гравийными подушками, в соответствии с законами механики, приведет к изменению направления движения трубопровода и разрушению свода скважины. Следствием этого будет значительное возрастание нагрузок при протаскивании трубопровода, вплоть до значений, не позволяющих его осуществлять.

Построение геомеханической модели подводного перехода с учетом данных гидродинамической модели фильтрации (ДНС 400 дПа, КП 1300 с⁻¹, ПВ 0,030 Па•с) показало, что запас прочности гравелистых песков на рассматриваемом участке увеличился и составляет от 1,12 до 1,2 (рис. 5).

Из проведенного анализа следует, что строительство скважин большого диаметра в несцементированных грунтах необходимо проводить с применением бурового раствора, содержащего не только глинопопорошок, но и водорастворимые полимеры, способные обеспечить получение раствора, обладающего значениями коэффициента пластичности более 1300 с⁻¹.

Итоги

На примере рассмотренной модели подводного перехода показано, что недостаточная прочность гравелистых песков на границе их перехода в полутвердые глины обусловлена совокупностью факторов, включающих применение бурового раствора, компонентный состав которого способствует получению суспензии с высокой коагуляционной, но низкой фильтрационной способностью.

Обрушение ствола скважины и, как следствие, увеличение тяговых усилий буровой установки возникло в результате контакта протаскиваемого трубопровода с накоплением галечникового грунта на нижней образующей скважины и последующего упора трубопровода в свод скважины. Применение геомеханической модели подводного перехода с учетом данных гидродинамического моделирования позволяет утверждать, что насыщение гравелистых песков высокоструктурированным буровым раствором (КП > 1300 с⁻¹) позволяет снизить пористость грунта и повысить его прочность. Это обеспечивает устойчивость ствола скважины в процессе бурения, что подтверждают результаты строительства построенных подводных переходов в подобных инженерно-геологических условиях.

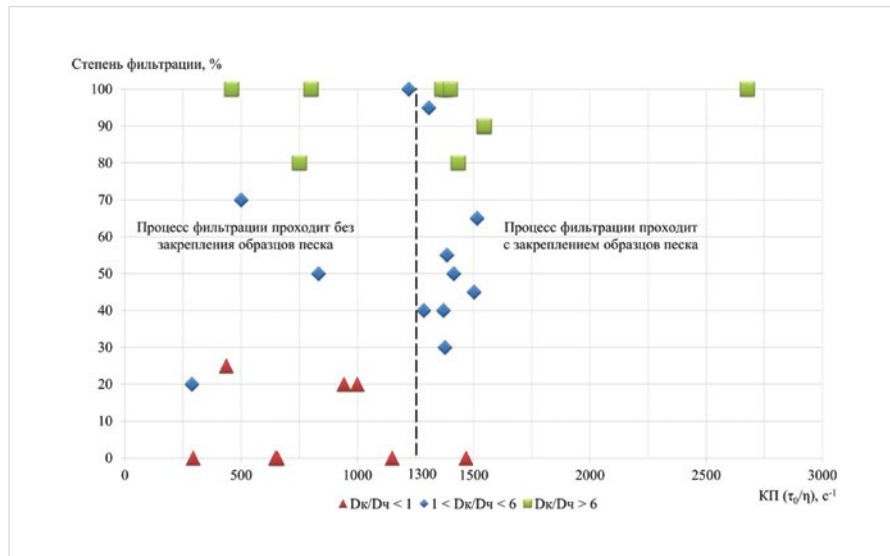


Рис. 4 — Степень фильтрации образца грунта технологическим раствором с различными значениями коэффициента пластичности

Fig. 4 — Soil sample filtration capacity when exposed to drilling fluids of various plasticity indices

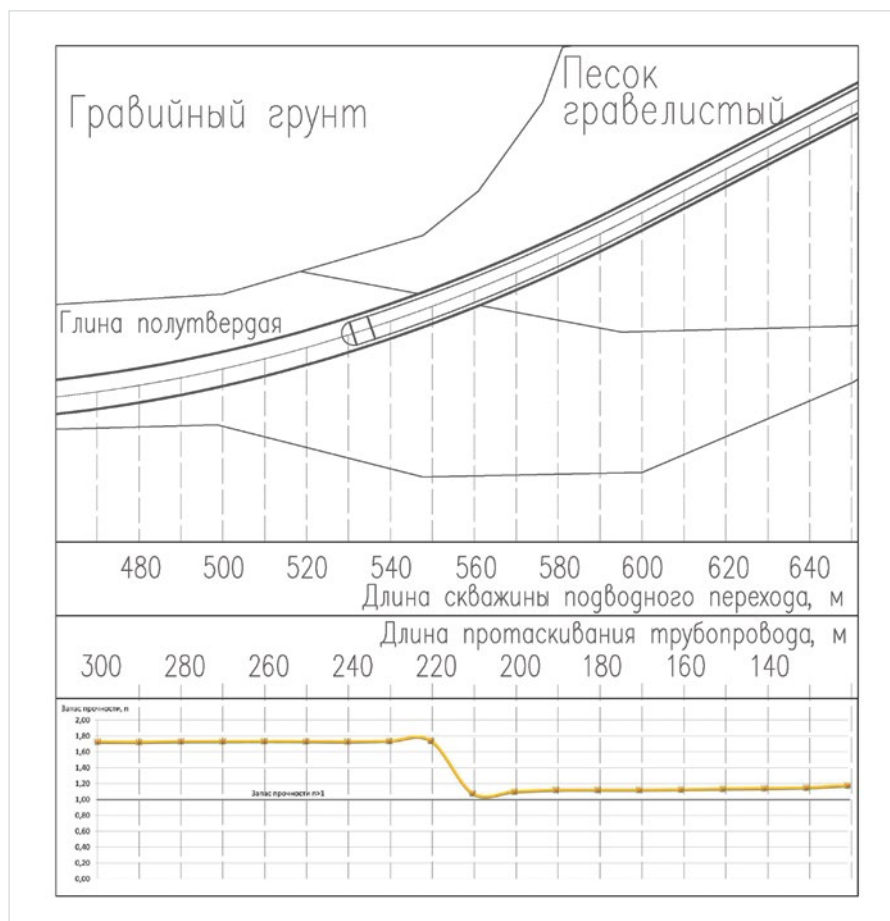


Рис. 5 — Запас прочности грунтов при протаскивании трубопровода с учетом применения высокоструктурированного бурового раствора

Fig. 5 — Soil strength margin at the interface between gravelly sand and semi-firm clay while dragging through a pipeline

Выводы

Разработка геомеханической модели подводного перехода и гидродинамической модели фильтрации позволяет прогнозировать возможные осложнения в процессе реализации метода наклонно направленного бурения при строительстве подводных переходов и находить технические решения по их предотвращению.

Список литературы

1. Попов А.Н., Головкина Н.Н.
Прочностные расчеты стенок скважины

в пористых горных породах. Уфа: УГНТУ, 2001. 70 с.

2. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии.
М.: Высшая школа, 1968. 629 с.
3. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП. 2.02.01-83*.
4. Маковей Н. Гидравлика бурения.
М.: Недра, 1986. 536 с.
5. Земляной А.А. Совершенствование методов изоляции водопритоков в скважинах с горизонтальным

окончанием. Дис. канд. техн. наук. Уфа, 2016. 125 с.

6. Шарафутдинов З.З., Спектор Ю.И., Скрепнюк А.Б. и др. Строительство переходов магистральных трубопроводов через естественные и искусственные препятствия.
Новосибирск: Наука, 2013. 339 с.
7. Газизов А.А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки.
М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. 639 с.

ENGLISH

DRILLING

Geomechanical modelling for analysis of directional drilling techniques in the course of construction of underwater passages

UDC 622.24+ 622.692.4

Authors:

Dinar R. Vafin — research assistant of underwater line and linear pipeline portions laying methods¹; VafinDR@niitnn.transneft.ru

Alexey N. Sapsay — vice president²;

Yuriy V. Lisin — Sc.D., general director¹;

Rim A. Kapayev — chief specialist of the support department for design and survey works²;

KapayevRA@ak.transneft.ru

Dmitry A. Shatalov — Ph.D., assistant laboratory chief of underwater line and linear pipeline portions laying methods¹; ShatalovDA@niitnn.transneft.ru

¹Transneft R&D, LLC, Moscow, Russian Federation

²PJSC Transneft, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents engineering solutions utilized in directional drilling as well as the impact they have on construction of underwater passages. This is exemplified by an accident development scenario of passing through gravel and cobble soils. Following the model of stress-strain state of soils composing the wellbore and based on fluid dynamics model pertaining to drilling mud filtration, potentially hazardous process failures have been analyzed.

Materials and methods

Geomechanical and fluid dynamics modelling of submerged crossing.

Results

The reviewed model of underwater passage suggests that poor stability of gravelly sand at the interface of semi-firm clay is determined by a number of factors, including application of drilling mud, the composition of which enables formation of suspension with high sealing and low filtration capacity. Wellbore collapse and increased pulling capacity of the drilling rig resulted from the contact of the pipeline with accumulated cobble soil on the lower edge of the well and further bumping of the pipeline against the well arch. Geomechanical modelling of underwater passage and fluid dynamics modelling data gives grounds for assertion that saturation of gravelly sand with highly structured drilling fluid (plasticity index > 1300 s⁻¹) helps to reduce soil porosity and increase its

strength. This ensures stability of the borehole while drilling which is proven by underwater passages constructed in similar geotechnical conditions.

Conclusions

Elaboration of geomechanical model of underwater passage and fluid dynamics model of filtration enables to predict problems arising in the course of construction of underwater passages with directional drilling. It also helps to find engineering solutions to prevent such problems.

Keywords

submerged crossing, directional drilling, wellbore collapse, drill fluid, mainline pipeline, geomechanical model

References

1. Popov A.N., Golovkina N.N. *Prochnostnyye raschety stенок skvazhin v poristyykh gornyykh porodakh* [Strength analysis of wellbores in porous rocks]. Ufa: UGNTU, 2001, 70 p.
2. Maslov N.N. *Osnovy mehaniki gruntov i inzhenernoj geologii* [Fundamentals of soil mechanics and engineering Geology]. Moscow: Vysshaya shkola, 1968, 629 p.
3. SP 22.13330.2011. *Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakcija* SNiP [Foundations of buildings and structures. The updated edition of SNiP]. 2.02.01-83*.
4. Makovey N. *Gidravlika bureniya* [Hydraulics of drilling]. Moscow: Nedra, 1986, 536 p.
5. Zemlyanoy A.A. *Sovershenstvovanie metodov izolyatsii vodopritokov v skvazhinakh s gorizontalmym okonchaniem* [Perfection of methods of isolation of water in wells with horizontal completion]. Dis. Cand. tech. Sciences. Ufa, 2016, 125 p.
6. Sharafutdinov Z.Z., Spector Yu.I., Skrepnyuk A.B. and oth. *Stroitel'stvo perekhodov magistral'nykh truboprovodov cherez estestvennyye i iskusstvennyye prepyatstviya* [Construction of crossings of trunk pipelines through natural and artificial obstacles]. Novosibirsk: Nauka, 2013, 339 p.
7. Gazizov A.A. *Uvelichenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov na pozdney stadii razrabotki* [Enhanced oil recovery heterogeneous reservoirs at a late stage of development]. Moscow: Nedra-Biznessentr, 2002, 639 p.