УДК 621.644.07

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ В СИСТЕМЕ ТРУБОПРОВОД — СКВАЖИНА ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ

QUANTITATIVE ESTIMATION OF CHANGES IN THE SYSTEM PIPELINE — WELL, IN CASE OF EMERGENCY SITUATION OCCURRENCE DURING HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING

В. С. Торопов, Т. Г. Пономарева, С. Ю. Торопов, Е. С. Торопов
V. S. Toropov, T. G. Ponomareva., S. Yu. Toropov, E. S. Toropov

Ноябрьский институт нефти и газа — филиал ТИУ, г. Ноябрьск
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: горизонтальное направленное бурение; трубопровод; буровой раствор; аварийная ситуация; грунт; скважина
Key words: Horizontal directional drilling; pipeline; mud; emergency; ground; well

Тенденции в бестраншейном строительстве, очевидно, будут приводить к возникновению значительного числа аварийных ситуаций разного рода [1]. В настоящее время это вызывается не только ошибками строительства, но и проектирования, а также отсутствием международной системы единых стандартов оборудования ГНБ [2].

Механизм взаимодействия трубопровода со стенкой скважины во время самого ответственного этапа ГНБ, протаскивания, оказывает решающее влияние на величину требуемого тягового усилия и одновременно является самым сложным элементом для исследования ввиду невозможности непосредственного наблюдения и количественного измерения параметров, а также многообразия процессов, которые могут иметь место при различных обстоятельствах производства работ.

Даже при отсутствии каких-либо осложнений этот механизм может иметь разный характер при различных вариантах организации процесса протаскивания. Схемы взаимодействия могут различаться в зависимости от свойств грунта и материала стенки трубы, наличия или отсутствия балластировки водой, а также от марки и качества бурового раствора [3]. Качественно изменить всю картину взаимодействия может применение какого-либо вспомогательного оборудования [4].

Для нештатной ситуации характерно появление дополнительных факторов, вносящих свои коррективы в механизм такого взаимодействия. Наиболее значительные — это потеря циркуляции бурового раствора и обрушение свода скважины.

При штатной ситуации, в первую очередь, формируется правильный ствол скважины в процессе пионерного бурения. Так как грунтовый массив находится в напряженном состоянии от собственного веса, и грунт в массиве уплотнен под действием этой силы, то бурение скважины вызывает падение напряжения в грунте, находящемся в непосредственной близости от пробуренной скважины. Это обстоятельство вызывает разуплотнение грунта и выпирание его в скважину на некоторую величину. То есть

при бурении скважины данного диаметра необходимо учитывать уменьшение ее диаметра за счет разуплотнения грунта.

Для оценки уменьшения диаметра необходимо рассмотреть среднее давление массива грунта на стенку скважины, пробуренной в грунтовом массиве. Под средним будем понимать давление от собственной массы грунта по горизонтальной плоскости, проходящей через центр скважины.

В этом случае давление грунта [2]

$$q_{ср} = \gamma_{гр} h_{ср} \ , \tag{1}$$

где $\gamma_{гр}$ — объемный вес грунта в естественном состоянии; $h_{ср}$ — расстояние от дневной поверхности до оси скважины.

Таким способом мы будем определять давление грунта до глубины бурения $h_{ср} < h_{св}$, на которой не образуется свод естественного равновесия. Свод естественного равновесия начинает образовываться с глубины

$$h_{св} = \frac{D_s}{tg^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) tg\varphi} \ , \tag{2}$$

где D_s — диаметр скважины; φ — угол внутреннего трения грунта.

Высота свода естественного равновесия

$$b_{св} = \frac{D_s\left[1 + tg^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)\right]}{2tg\varphi} \ . \tag{3}$$

При достижении $h_{ср}$ величины $h_{св}$ давление массива грунта на стенку скважины будем определять как

$$q_{ср} = \gamma_{гр} b_{св}. \tag{4}$$

Но скважина, в процессе бурения и протаскивания в нее трубопровода, полностью заполнена буровым раствором, который, в свою очередь, создает давление на стенку скважины изнутри. Давление бурового раствора на глубине $h_{ср}$ будет

$$q_б = \gamma_б h_{ср}, \tag{5}$$

где $\gamma_б$ — объемный вес бурового раствора.

Проанализируем давление, оказываемое на стенку скважины со стороны грунтового массива и бурового раствора. Для этого используем профиль скважины, пробуренной по некоторому радиусу $R_{скв}$ и длиной в плане $L_{скв}$.

Поместим начало координат в точке входа трубопровода в скважину. Тогда уравнением кривой, описывающей скважину, будет уравнение окружности радиуса R, начало координат которой располагается в точке $\left(\frac{L}{2}; \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}}\right)$:

$$\left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(y - \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}}\right)^2 = R^2 \tag{6}$$

или

$$y^2 - 2\sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}}\, y + x^2 - xL = 0. \tag{7}$$

Решением этого уравнения будет

$$y_{1,2} = \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \pm \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4} - x^2 + xL}. \tag{8}$$

Корни уравнения будут давать нам заглубление оси скважины в данной точке.

Далее, обращая внимание на то, что превышение заглубления скважины глубины образования свода естественного равновесия обусловливает изменение давления на стенку скважины со стороны грунтового массива, построим графики изменения давлении грунта и бурового раствора на стенку скважины.

На рис. 1 изображены эпюры давления на стенку скважины в зависимости от величины заглубления со стороны грунтового массива и бурового раствора. Массив грунта и буровой раствор давят на стенку скважины с разных сторон, поэтому эпюры этих давлений имеют противоположные знаки.

Дневная поверхность изображена пунктирной линией. На графике (3) существуют две области H_1 и H_2, в которых давление от грунтового массива резко падает из-за появления свода естественного равновесия. На всем протяжении скважины, ниже глубины образования свода естественного равновесия, давление грунтового массива постоянно.

Давление бурового раствора изнутри скважины изменяется пропорционально глубине скважины.

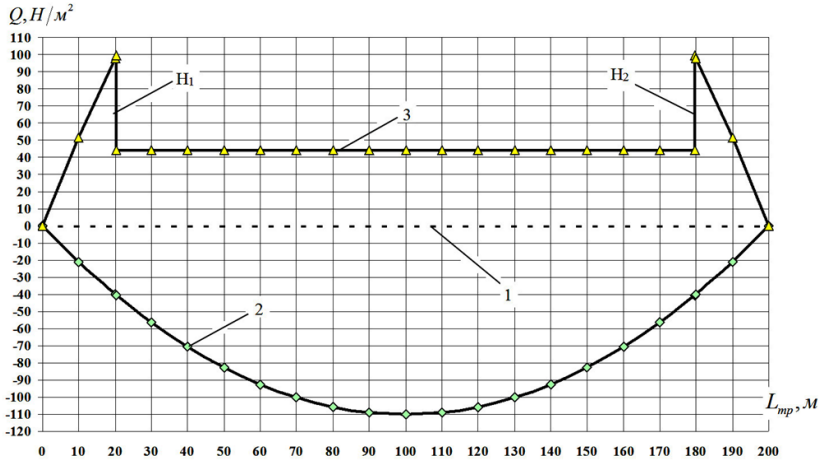

Рис. 1. ***Распределение давления на стенку скважины со стороны грунтового массива (3) и бурового раствора (2), пунктиром показана дневная поверхность (1)***

На рис. 2 показано суммарное давление на стенку скважины. Из приведенных зависимостей следует, что участок скважины, находящийся ниже глубины образования свода естественного равновесия грунта, попадает в отрицательную зону эпюры.

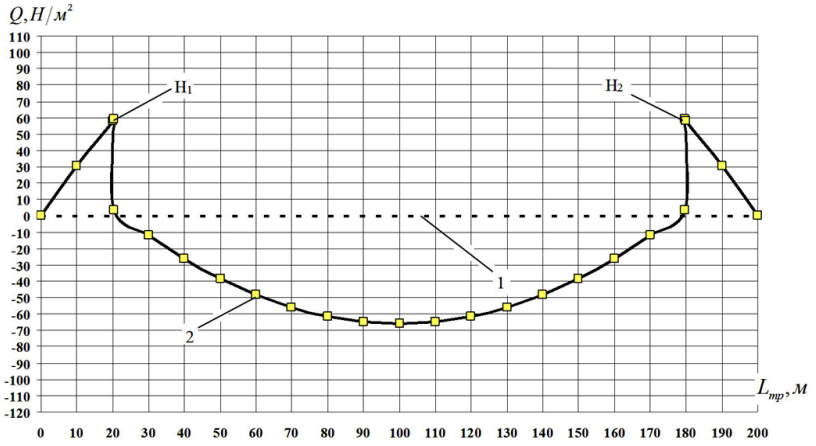

Рис. 2. ***Распределение суммарного давления на стенку скважины со стороны грунтового массива и бурового раствора (2), пунктиром показана дневная поверхность (1)***

То есть на этом участке давление бурового раствора превышает давление грунтового массива. Следовательно, выпучивание грунта внутрь пробуренной скважины не может иметь место на этом участке.

На участках входа и выхода наблюдается иная картина. Здесь из-за того, что на стенку скважины давит не только свод естественного равновесия, а весь грунт, находящийся выше, давление грунта превышает давление бурового раствора. Значит, именно на участках входа и выхода может наблюдаться разуплотнение грунта внутрь скважины. Выпучивание грунта будет происходить пропорционально разнице давлений грунта и бурового раствора.

Таким образом, в штатной ситуации, когда буровой раствор удерживает стенки скважины от обрушения, разуплотнение грунта внутрь скважины может происходить только на коротких участках на входе и выходе скважины, являющихся в этом смысле потенциально опасными.

При потере циркуляции бурового раствора в потенциально опасную зону попадает весь ствол скважины. К тому же протаскиваемый трубопровод теряет нулевую плавучесть и входит в контакт с нижней образующей скважины.

Теоретически при идеально гладкой и недеформируемой поверхности трубопровода и скважины ширина полосы контакта будет равна нулю, поскольку контакт происходит лишь в точке соприкосновения трубопровода и скважины.

Практически контактируемые поверхности обладают определенной шероховатостью, кроме того, на разных участках имеет место проседание трубопровода под собственным весом и под действием изгибающих усилий. Поэтому будем рассматривать случаи касания трубопроводом стенки скважины и случай деформации ее трубопроводом как один и тот же случай с разными количественными характеристиками, а именно проседанием трубопровода относительно стенки скважины.

Рассмотрим деформацию трубопроводом нижней образующей скважины (данный расчет будет справедлив для отклонения трубопровода от оси скважины в любую сторону). Таким образом, трубопровод, деформируя нижнюю образующую скважины, заглубляется на некоторую величину h (рис. 3), которая определяет ширину полосы контакта трубопровода и скважины L. На рис. 3 стенка скважины и внешняя стенка трубы изображены как две окружности, диаметрами соответственно D_s и d_e (радиусы R_s и r_e), нижние точки которых смещены друг относительно друга на величину заглубления трубопровода h. Начало координат помещено в нижнюю точку окружности радиусом R_s.

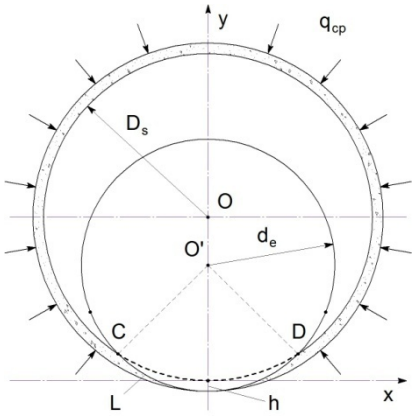

Рис. 3. ***Схема контакта трубопровода со стенкой скважины в отсутствии бурового раствора***

Для определения ширины зоны контакта трубопровода и стенки скважины L найдем координаты пересечения окружностей в точках C и D. Для этого запишем уравнения этих окружностей.

Для скважины

$$x^2 + \left(y - R_s\right)^2 = R_s^2. \qquad (9)$$

Для трубы

$$x^2 + \left(y - r_e + h\right)^2 = r_e^2. \tag{10}$$

При решении данной системы уравнений получим

$$y = \frac{h\left(2r - h\right)}{2\left(R_s - r_e + h\right)}, \tag{11}$$

$$x = \sqrt{R_s^2 - \left(y - R_s\right)^2}. \tag{12}$$

Применим формулы геометрии на плоскости и выразим ширину зоны контакта трубопровода и стенки скважины

$$L = 2r_e \arcsin\frac{x}{r_e}, \tag{13}$$

то есть

$$L = 2r_e \arcsin\frac{\sqrt{R_s^2 - \left(\frac{h\left(2r_e - h\right)}{2\left(R_s - r_e + h\right)} - R_s^2\right)}}{r_e}. \tag{14}$$

Таким образом, площадь поверхности $S_{гр}$ контакта участка трубопровода длиной $L_{тр}$ с грунтом определится как

$$S_{гр} = L_{тр} \cdot L. \tag{15}$$

Площадь контакта участка трубопровода с буровым раствором

$$S_б = L_{тр}\left(2\pi r_e - L\right). \tag{16}$$

На рис. 4 изображена схема смятия трубопроводом стенки грунтовой скважины.

В процессе взаимодействия трубопровода со стенкой скважины, при заглублении трубы на величину h, стенка скважины сминается, и грунт деформируется. Здесь через L^* обозначена ширина полосы деформации скважины.

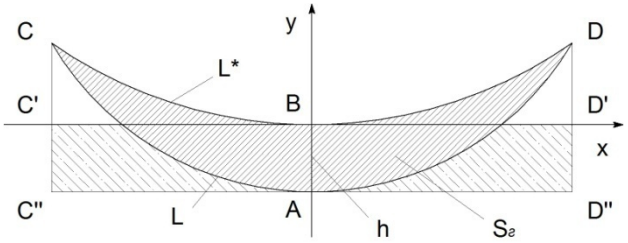

Рис. 4. ***Схема взаимодействия скважины и стенки трубопровода:***
h — величина заглубления трубопровода, L — ширина зоны контакта трубопровода с грунтом, $S_г$ — площадь грунта, деформируемого трубопроводом

Преобразуем зону деформации грунта $ACBL$ площадью $S_г$ в зону деформации $C'C''D''D'$. Переносим точки C и D перпендикулярно вниз до пересечения с осью Ox. Получаем прямоугольное сечение (глубина h, длина поверхности контакта $b = C'D'$), которое более удобно использовать в расчетах. Кроме того, выбор именно такого сечения позволяет нам говорить о том, что расчет ведется с некоторым запасом. Таким образом, будем рассматривать деформацию плоской поверхности на величину h по линии длиной

$$b_{кон} = 2r_e \sin\frac{L}{2r_e}. \quad (17)$$

В соответствии с ней реакция грунта основания в каждой точке подошвы балки прямо пропорциональна осадке этой точки [5]:

$$P_{гр} = k_s h, \quad (18)$$

где $P_{гр}$ — реакция грунта; h — величина осадки трубопровода; k_s — коэффициент постели.

Тогда сила отпора грунта, действующая на погонный метр трубопровода, будет

$$F_{гр} = k_s h b_{кон}. \quad (19)$$

Определять коэффициент постели будем в соответствии с зависимостями, изложенными в [6], полученными на основании проведения штамповых испытаний.

Формула Буссинеска для определения модуля деформации грунта в натурных условиях связывает коэффициент постели с модулем деформации грунта для квадратного штампа и коэффициента бокового расширения грунта $\nu_{гр} = 0{,}25$

$$E_{гр} = 55k_s. \quad (20)$$

Таким образом, для определения осадки трубопровода в грунте необходимо задать модуль деформации грунта.

При возникновении аварийной ситуации резко увеличивается тяговое усилие, необходимое для дальнейшего движения трубопровода внутри скважины. С помощью приведенных выше подходов имеется возможность количественно оценить величину дополнительного сопротивления перемещения трубы по смятой стенке буровой скважины при отсутствии в ней нормальной циркуляции бурового раствора и, как следствие, потери протаскиваемым трубопроводом нулевой плавучести.

Для описания полной картины взаимодействия необходимо дополнительно учесть явление присоса, а также фактор возможного наличия воды во внутренней полости трубопровода, помещенной туда в целях его балластировки.

Список литературы

1. Торопов Е. С., Торопов В. С., Земенков Ю. Д., Сероштанов И. В. Осложнения при сооружении переходов трубопроводов методом горизонтального направленного бурения // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2015. – № 5. – С. 32-37.
2. Брейдбурд А. И. Роль подземных инженерных коммуникаций при комплексном освоении подземного пространства // Строительство. Технологии. Организация. – 2016. – № 46. – С. 34-36.
3. Кирьянов И. Е., Торопов В. С., Торопов С. Ю. Определение зависимостей силы сопротивления движению трубопровода в искривленной скважине от физических параметров и реологической модели применяемого бурового раствора // Нефтяное Хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 48-50.
4. Торопов В. С., Торопов Е. С., Подорожников С. Ю., Сероштанов И. В. Применение дополнительного оборудования в технологии горизонтального направленного бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S4. – С. 207-214.
5. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Стройиздат, 1981. – 319 с.
6. Косте Ж., Санглера Г. Механика грунтов. Практический курс. – М.: Стройиздат, 1981. – 455 с.
7. Бородавкин П. П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. – М.: Недра, 1986. – 224 с.

Сведения об авторах

Торопов Владимир Сергеевич*, к. т. н., доцент кафедры «Транспорта и технологии нефтегазового комплекса», Ноябрьский институт нефти и газа — филиал ТИУ, г. Ноябрьск, тел. 8(3496)428389, e-mail: 264301@mail.ru*

Пономарева Татьяна Георгиевна*, к. т. н., доцент, доцент кафедры «Транспорта углеводородных ресурсов», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)201931, e-mail: zemenkov@tsogu.ru*

Торопов Сергей Юрьевич, *д. т. н., профессор кафедры «Транспорта углеводородных ресурсов», Тюменский индустриальный университет, тел.*

Information about the authors

Toropov V. S., *Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Transport and technologies of petroleum complex», Noyabrsk Institute of Oil and Gas, affiliate of the Industrial University of Tyumen, phone: 8(3496)428389, e-mail: 264301@mail.ru*

Ponomareva T. G., *Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Transport of hydrocarbon resources», Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)201931, e-mail: zemenkov@tsogu.ru*

Toropov S. Yu., *Doctor of Engineering, professor of the chair «Transport of hydrocarbon resources», Industrial University of Tyumen, phone:*

8(3452)201931, e-mail: 89222639334@mail.ru

Торопов Евгений Сергеевич, *к. т. н., доцент кафедры «Транспорт и технология нефтегазового комплекса», Ноябрьский институт нефти и газа — филиал ТИУ, г. Ноябрьск, тел. 8(3496)428389, e-mail: toropov_e_s@mail.ru*

8(3452)201931, e-mail: 89222639334@mail.ru

Toropov E. S., *Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Transport and technologies of petroleum complex», Noyabrsk Institute of Oil and Gas, affiliate of the Industrial University of Tyumen, phone: 8(3496)428389, e-mail: toropov_e_s@mail.ru*