

## УКЛАДКА МНОЖЕСТВА ТРУБОПРОВОДОВ В ОДНУ СКВАЖИНУ МЕТОДОМ ГНБ

<sup>1</sup>Торопов В.С., <sup>2</sup>Берг В.И., <sup>2</sup>Торопов Е.С., <sup>3</sup>Щерба В.Е.

<sup>1</sup>Ноябрьский институт нефти и газа ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: 264301@mail.ru,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: toropov\_e\_s@mail.ru

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия, e-mail: info@omgtu.ru

**Проведен анализ взаимодействия буровой скважины и протаскиваемого пучка трубопроводов при использовании метода горизонтального направленного бурения с точки зрения вязкого трения. Исследование проводилось на примере специального оборудования для протаскивания множества трубопроводов в одну буровую скважину производства американской фирмы *Melfred Borzall*. С принятием ряда допущений получена расчетная модель движения пучка трубопроводов в буровом растворе, для которого была принята вязко-пластическая модель. Получены зависимости зазора между пучком трубопроводов и стенкой скважины от вязкого трения глинистого бурового раствора. Установлено оптимальное соотношение диаметров скважины и пучка протягиваемых в нее труб с позиции анализа вязкого трения, что позволяет сократить объемы земляных работ при бурении пилотной скважины, а также уменьшить временные затраты, требующиеся для выполнения дополнительных циклов расширения.**

Ключевые слова: Горизонтальное направленное бурение, множество трубопроводов, буровой раствор, бентонит, скважина

## MULTIPLE PIPE INSTALLATION INTO ONE BOREHOLE USING HDD METHOD

<sup>1</sup>Toropov V.S., <sup>2</sup>Berg V.I., <sup>2</sup>Toropov E.S., <sup>3</sup>Shcherba V.E.

<sup>1</sup>Noyabrsk oil and gas institute of FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: 264301@mail.ru

<sup>2</sup>FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: toropov\_e\_s@mail.ru

<sup>3</sup>FGBO of higher education "Omsk state technical university", Omsk, Russia, e-mail: info@omgtu.ru

**Interaction between the borehole and drag the beam pipes by using the method of horizontal directional drilling in terms of viscous friction is analyzed in this article. The study was conducted on the example of special equipment for pulling a plurality of pipes in a borehole produced by the American company *Melfred Borzall*. With the adoption of a number of assumptions derived calculation model the motion of the beam pipes in the mud, which was adopted for the visco-plastic model. The dependences of the gap between the bundle of pipes and the borehole wall by friction of viscous clay mud. The optimal ratio of the diameter of the well and the beam pipe stretching it from the perspective of analysis of viscous friction, thereby reducing the amount of excavation for drilling a pilot hole and reduce the time costs required to perform additional cycles of expansion.**

Keywords: Horizontal directional drilling, multiple pipe, drilling fluid, bentonite, borehole

Технология горизонтального направленного бурения позволяет укладывать сразу несколько труб в одну скважину, выполняя одновременное протаскивание пучка рабочих трубопроводов с применением соответствующего оборудования [7]. Для этих целей в процессе протяжки используется специальный оголовок, к которому крепятся все трубопроводы [10]. Данный вид оборудования выпускают несколько производителей, например, американская фирма *Melfred Borzall*. При условии отсутствия пересечений протягиваемых труб между собой, они свободно двигаются вслед за оголовком по стволу скважины. Протяжка нескольких трубопроводов в одну скважину достаточно широко

применяется в практике строительства. Если прокладываемые таким способом трубопроводы требуют разделения между собой в целях противокоррозионной защиты, то используются различные виды изолирующих вставок и покрытий [2,3].

Протягивание пучка трубопроводов в грунтовую скважину может потребовать от буровой установки развития более значительных усилий в виду увеличения общей массы материала, прикрепленного к оголовку, изменения силы прижатия к верхней стенке скважины, при положительной плавучести, и увеличения силы трения о стенку скважины. Уменьшение этих дополнительных нагрузок может в определенной степени быть достигнуто путем увеличения диаметра скважины, то есть зазора между внешней образующей пучка трубопроводов и стенкой буровой скважины [5].

Однако в практических условиях увеличение диаметра скважины ведет к возрастанию объема работ по расширению скважины, увеличению временных затрат, снижению экономической эффективности строительства [1]. К тому же величина технологического зазора между пучком труб и стенкой скважины находится во взаимосвязи с физическими свойствами применяемого бурового раствора, благодаря вызываемых буровой жидкостью усилий вязкого трения.

С целью упрощения решения задачи для пучка труб примем следующие допущения. Первое. Для вязкопластической модели бурового раствора, в соответствии с которой при превышении напряжения  $\tau$  предельного напряжения сдвига  $\tau_0$ , буровой раствор ведет себя как ньютоновская жидкость, воспользуемся законами течения вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости. И второе. Конструкции специальных оголовков для протаскивания пучков труб предполагают достаточно плотную их посадку на близком расстоянии друг от друга. А поскольку мы имеем дело с вязкой жидкостью, пренебрежем движением бурового раствора внутри пучка труб, заменив весь пучок окружностью условного диаметра, равного расстоянию между внешними образующими крайних труб в пучке (рис.1.).

В таком случае мы можем провести анализ зависимости зазора от вязкого трения бурового раствора следующим образом.

Уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости (уравнение Навье – Стокса) в векторной форме [4]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \frac{\eta}{\rho} \Delta v \quad (1)$$

где  $v$  – скорость,

$t$  – время;

$\nabla$  - оператор набла;

$\eta$  - коэффициент динамической вязкости бурового раствора;

$p$  – давление;

$\Delta$  – векторный оператор Лапласа;

$\rho$  – плотность бурового раствора.

Тензор напряжений в несжимаемой жидкости имеет вид:

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + \eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

Для удобства расчетов воспользуемся уравнениями в цилиндрических координатах.

Ось  $z$  расположим по оси скважины.

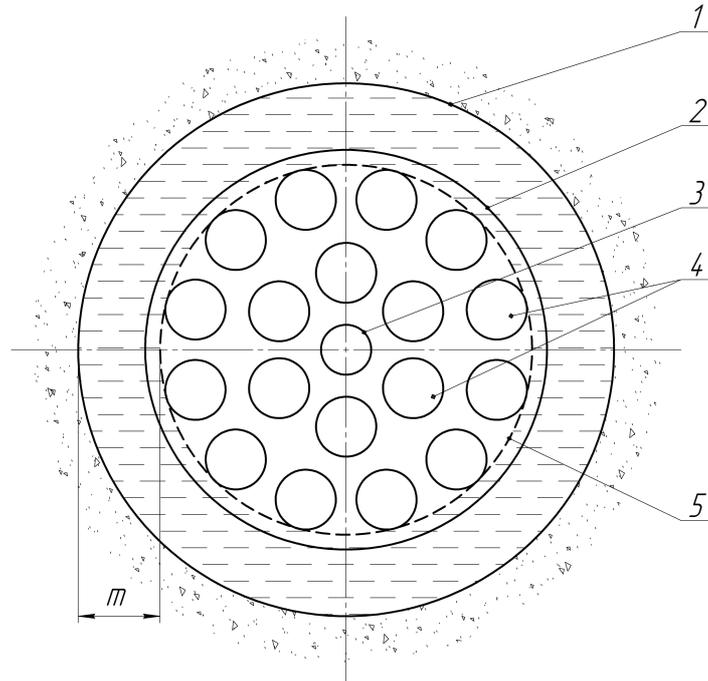


Рис.1. Расчетная схема исследования влияния вязкого трения бурового раствора на условный зазор между пучком труб и стенкой скважины: 1 – стенка грунтовой скважины; 2 – внешняя образующая оголовка, на котором закреплен пучок труб; 3 – место крепления оголовка к буровой колонне; 4 – протягиваемые трубопроводы; 5 – линия условного диаметра для расчета величины оптимального зазора;  $m$  – величина зазора.

В цилиндрических координатах  $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$  компоненты тензора напряжений выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -p + 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} & \sigma_{r\varphi} &= \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right) \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= -p + 2\eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} \right) & \sigma_{\varphi z} &= \eta \left( \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} \right) \\ \sigma_{zz} &= -p + 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} & \sigma_{zr} &= \eta \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Три компоненты уравнения Навье – Стокса принимают вид:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + (v\nabla)v_r - \frac{v_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right)$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + (v\nabla)v_\varphi + \frac{v_r v_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + v \left( \Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + (v\nabla)v_z = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial z} + v \Delta v_z$$

причем операторы  $(v\nabla)$  и  $\Delta$  определяются формулами:

$$(v\nabla)f = v_r \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial f}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial f}{\partial z} \quad (5)$$

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (6)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Теоретически, в зависимости от продольного профиля скважины и приложенных к нему нагрузок, пучок труб или одиночный трубопровод на разных участках может занимать в поперечном сечении следующие положения:

- a) Трубопровод может находиться во взвешенном состоянии. При этом ось трубопровода будет совпадать с осью скважины.
- b) Находиться также во взвешенном состоянии, но ось трубопровода не будет совпадать с осью скважины.
- c) Прилегать к стенке скважины с любой стороны.
- d) Деформировать стенку скважины.

Положение *b* может иметь место на отдельных участках при изменении радиуса кривизны. Положения *c* в чистом виде реализовано быть не может, т.к. при любом касании стенки скважины происходит ее деформация в той или иной степени, в зависимости от соотношения деформационных свойств грунта и величины усилия, прижимающего трубопровод к стенке скважины, т.е. реализуется положение *d*.

Положение *a* будем использовать для определения величины оптимального зазора между стенкой скважины и пучком трубопроводов, как наиболее удобное для решения такой задачи.

В этом случае, имеем условный трубопровод внешнего радиуса  $r_e$ , движущийся со скоростью  $u$  внутри скважины радиуса  $R_s$ , параллельно своей оси, причем оси трубопровода и скважины совпадают (рис.2.).

Определим скорость движения бурового раствора, заполняющего пространство между условным трубопроводом и стенкой скважины.

Выбираем цилиндрические координаты с осью  $z$  по оси трубопровода. Скорость

направлена везде вдоль оси  $z$  и зависит только от  $r$ :

$$v_z = v(r) \quad (8)$$

Для  $v$  получаем уравнение:

$$\Delta v = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) = 0 \quad (9)$$

(член  $(v \nabla) = v \partial v / \partial z$  исчезает тождественно). Используя граничные условия  $v = u$  при  $r = r_e$  и  $v = 0$  при  $r = R_s$ , получаем [4]:

$$v = u \frac{\ln(r/R_s)}{\ln(r_e/R_s)} \quad (10)$$

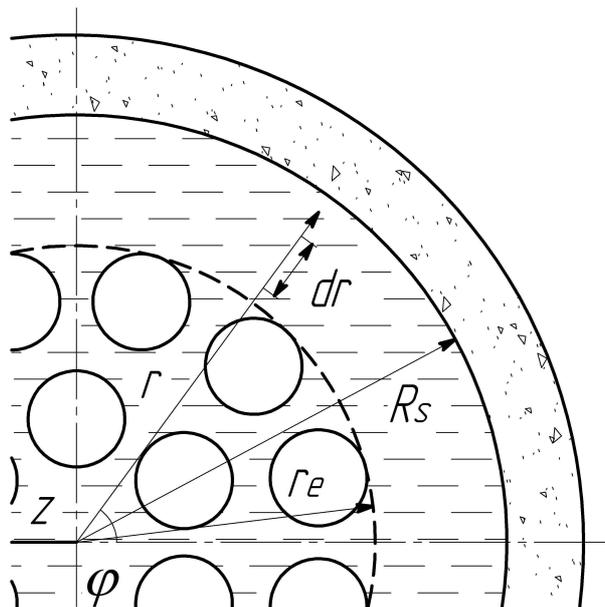


Рис.2. Поперечное сечение пучка труб, находящихся во взвешенном состоянии:  $R_s$  – радиус скважины;  $r_e$  – внешний радиус пучка труб;  $z$  – координатная ось, направленная по оси скважины и пучка труб.

Тангенциальные напряжения, действующие на единицу длины условного трубопровода, равны:

$$\tau = \frac{\eta u}{r_e \ln(R_s/r_e)} \quad (11)$$

а, с учетом предельного напряжения сдвига:

$$\tau = \tau_0 + \frac{\eta u}{r_e \ln(R_s/r_e)} \quad (12)$$

Используем расчет скорости движения бурового раствора в зазоре для анализа величины зазора между пучком труб и стенкой скважины.

В уравнении (12) член  $\tau_0$  остается постоянным и не зависит от зазора, и сила сопротивления от начального напряжения сдвига, действующая на единицу длины условного трубопровода будет постоянна:

$$F_H = \tau_0 \pi d_e \quad (13)$$

При нахождении зависимости силы сопротивления от величины зазора  $F_H$  можно отбросить, так как она не меняет качественно вид зависимости.

Составляющая силы сопротивления, которая будет зависеть от величины зазора, выразится как:

$$F_B = \frac{\eta u}{r_e \ln(R_S/r_e)} \pi d_e = \frac{2\pi\eta u}{\ln(R_S/r_e)} \quad (14)$$

Для нахождения вида зависимости силы  $F_B$  от отношения диаметров  $R_S/r_e$  запишем:

$$\frac{F_B}{2\pi\eta u} = \frac{1}{\ln(R_S/r_e)} \quad (15)$$

Зависимость  $\frac{F_B}{2\pi\eta u}$  от  $\frac{1}{\ln(R_S/r_e)}$  приведена на рис 3.

Для отыскания оптимального значения отношения диаметров условного трубопровода и скважины найдем точку перегиба кривой. В этой точке касательная к кривой будет расположена под углом  $45^\circ$  к оси ординат.

То есть, нужно решить уравнение:

$$\left( \frac{1}{\ln(R_S/r_e)} \right)' = -1 \quad (16)$$

Решением этого уравнения будет:

$$R_S/r_e = 1,06 \quad (17)$$

Это значение в особой точке. Справа от него функция возрастает незначительно, а слева наблюдается резкий рост функции. Следовательно, значения аргумента, большие 1,06 являются приемлемыми. Но, так как в задачу входит минимизация объемов земляных работ при бурении скважины, принимается минимальное из допустимых значений.

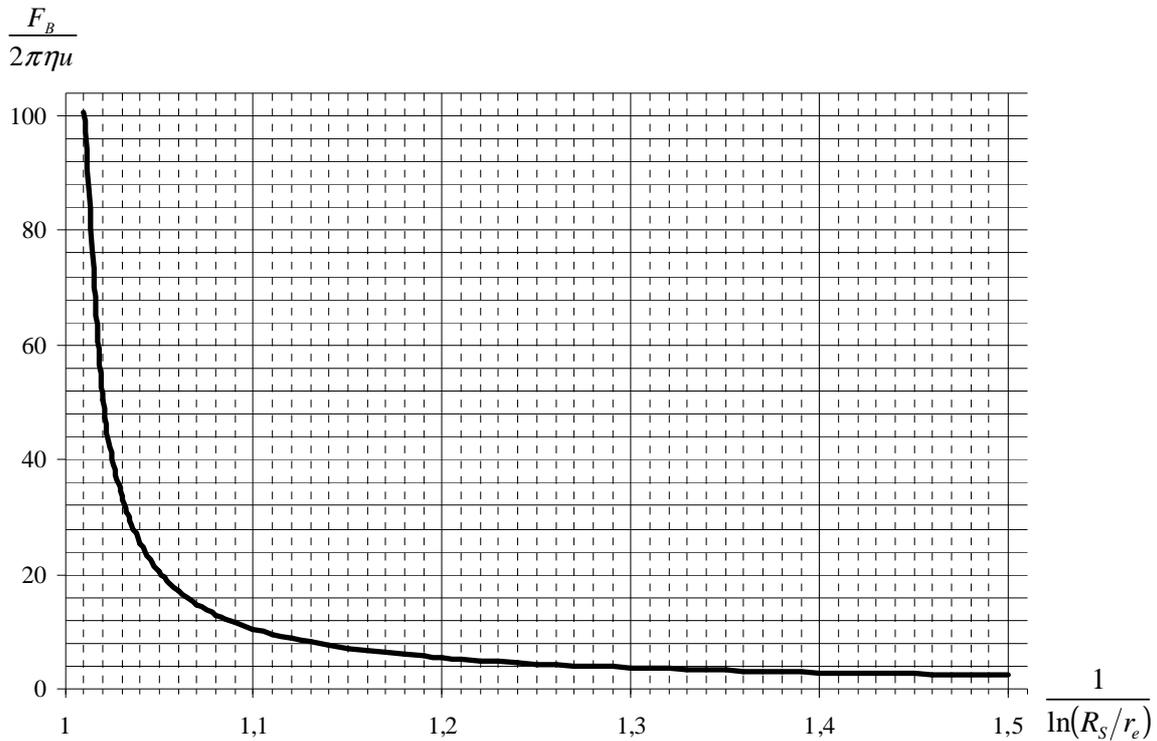


Рис.3. Зависимость силы вязкого трения от отношения диаметров скважины и трубопровода

Округляя до десятых, получим, что отношения диаметров пучка труб и скважины равного 1,1 вполне достаточно, т.е. с точки зрения анализа силы вязкого трения в зазоре:

$$R_s/r_e = 1,1 \quad (18)$$

Таким образом, установлено оптимальное соотношение диаметров скважины и пучка протягиваемых в нее труб с позиции анализа вязкого трения, что позволяет сократить объемы земляных работ при бурении пилотной скважины.

Величина зазора между внешней образующей протаскиваемого пучка трубопроводов и стенкой скважины при прокладке трубопроводов методом горизонтального направленного бурения является одним из важнейших параметров системы «скважина-трубопровод» и определяется отношением диаметров скважины и трубопровода и положением трубы по сечению скважины [9]. И кроме величины вязкого трения бурового раствора о стенку трубопровода для оценки зазора необходимо учитывать величину давления на стенку скважины со стороны грунтового массива и бурового раствора [8].

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 [6]. Это обстоятельство вызывает разуплотнение грунта и выпирание его в скважину на некоторую величину. Таким образом, при бурении скважины данного диаметра необходимо учитывать уменьшение ее диаметра за счет разуплотнения грунта.

## Список литературы

1. Антипьев В.Н., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б. и др. Техническая и параметрическая диагностика в трубопроводных системах. Тюмень: Вектор Бук, 2002.- С. 432.
2. Земенкова М.Ю., Шиповалов А.Н., Дудин С.М., Земенков Ю.Д. Системный анализ в процессах контроля и управления нефтегазовых объектов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. -2007, № 5. -С. 116-119.
3. Ибрагимов А.А., Подорожников С.Ю., Шабаров А.Б., Медведев М.В., Земенкова М.Ю. Расчетная модель и алгоритм определения остаточного ресурса трубопровода в условиях периодических изменений напряжений и коррозии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – Москва: Горная книга – 2014, № S4. С. 199-206.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. Том VI. - М.: Наука, 1986. - 562 с.
5. Мониторинг гидродинамических и технических характеристик трубопроводных систем: Учебное пособие. Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. – Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2008 – 432 с.
6. Смирнов В.В. Применение метода граничных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния надземных магистральных нефтепроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах / Смирнов В.В., Земенков Ю.Д. // Трубопроводный транспорт: теория и практика. -2013. -№ 4. -С. 18-23.
7. Техника и технологические процессы при транспорте энергоресурсов: Учебное пособие в 2-х томах. Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. -Тюмень: Изд. «Вектор Бук». -2008. -т.1. - 380 с.
8. Торопов Е.С., Кирьянов И.Е., Торопов В.С. Методы снижения энергозатрат в процессе протяжки трубопровода в скважину при использовании технологии наклонно-направленного бурения для сооружения промышленных объектов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2014, № S4, с. 207-214.
9. Транспорт и хранение нефти и газа в примерах и задачах: учеб. пособие/Под общ. ред. Ю.Д. Земенкова. -СПб.: Недра, 2004. -544 с.
10. Willoughby D. Horizontal Directional Drilling Utility and Pipeline Applications. / New York, The McGraw-Hill Companies, 2005, p. 68 - 75.

### Рецензенты:

Соколов С.П., д.т.н., профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень;

Чекардовский М.Н., д.т.н., профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов»,  
ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г.Тюмень.