

УДК 531.8+622.23.05

А.В. Корчак, Ю.А. Алюшин, Р.А. Никитушкин

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВНЕДРЕНИЯ В ГРУНТ ЗАМОРАЖИВАЮЩЕЙ КОЛОНКИ С ВИНТОВОЙ НАВИВКОЙ

Сопоставление результатов расчета с опубликованными и экспериментальными данными позволяет утверждать, что предлагаемую математическую модель можно использовать при расчете усилий и моментов для конструкций замораживающих колонок с винтовой навивкой, не предусматривающих перемещение грунта внутри полости трубы. Если такие колонки ориентированы для небольших глубин, тогда при их изготовления можно использовать стали обыкновенного качества, при этом применение сварки для закрепления катанки на внешнем контуре не будет способствовать существенному снижению механических характеристик материала трубы.

Ключевые слова: замораживающие колонки с винтовой навивкой, энергетическая модель, расчет параметров колонки, замораживание, характеристики бурового оборудования.

При строительстве подземных сооружений в особо сложных гидрогеологических условиях используют способ искусственного замораживания грунтов. Однако применение этого способа сопряжено с большими материальными, энергетическими и стоимостными затратами. Для сокращения сроков искусственного замораживания грунтов, снижения материальных и энергетических затрат предложена новая конструкция замораживающих колонок [15], позволяющая погружать замораживающую колонку на заданную глубину без выполнения буровых работ. Погружение замораживающей колонки на требуемую глубину при этом осуществляется завинчиваемым способом за счет вращающего момента, развиваемого буровой машиной. Осевое перемещение замораживающей колонки при наличии вращательного момента осуществляется за счет оребрения поверхности замораживающей колонки, выполненной в виде винтовой линии с заданными параметрами в зависимости от типа грунта.

Для реализации предлагаемой технологии замораживания грунтов с применением колонок нового типа в производственных условиях необходимо знать величины осевых усилий и крутящих моментов, обеспечивающих погружение колонок на требуемую глубину в зависимости от физико-механических свойств грунтов.

Анализ литературных источников показал, что теоретические и экспериментальные исследования по рассматриваемому вопросу отсутствуют. Имеются теоретические и экспериментальные исследования по определению осевых усилий и крутящих моментов, которые изложены в работах [1, 2], получены для буровой колонны при бурении скважин и не учитывают специфику погружения замораживающих колонок в грунт. Анализ предлагаемых зависимостей показал, что они основаны на экспериментальных данных и имеют полуэмпирический характер, результаты могут отличаться от наблюдаемых в действитель-

ности как в большую, так и в меньшую сторону на десятки и даже сотни процентов.

Учитывая возможные негативные последствия разрушений буровых колонок, при расчетах на прочность и выборе мощности привода целесообразно ориентироваться на верхнюю оценку возможных усилий или моментов, чтобы с помощью различных устройств предупреждать поломку основных элементов буровых установок.

Ниже рассмотрена энергетическая модель внедрения замораживающей колонки в грунт с использованием экстремальных принципов механики сплошных сред [3, 4, 5], которые позволяют дать с точностью, соответствующей точности основных механических характеристик грунта, верхнюю оценку требуемых для продвижения колонки осевых усилий и крутящих моментов.

Для построения модели принята конструкция замораживающей колонки, выполненной в виде пустотелой трубы диаметром 0,075 - 0,159 м с толщиной стенки 6 мм, на внешнюю поверхность которой приварена катанка диаметром 10-15 мм и шагом 15-45 мм (по информации на рис. 4 шаг навивки может изменяться от 35 мм до 250 мм). Заходная часть колонки в виде сплошного конуса высотой (в направлении движения колонки) 15 см предназначена для увеличения плотности грунта в прилегающих к колонке объемах без возможности его проникновения во внутреннюю полость трубы.

По предварительным наблюдениям такая колонка может продвигаться за счет внешних источников энергии (продольной силы Q и/или вращающего момента M) на глубину до 20 м и более в сжимаемой среде или в среде с минимальным внутренним трением, например, в жидкости или в водоносных слоях грунта. Осевое усилие Q и момент M должны соответствовать мощности, необходимой на сжатие грунта и преодоление сил трения на внешней поверхности колонки с учетом винтовой поверхности приваренных ребер. Энергетический баланс можно записать в виде [3, 4]

$$Q \cdot v_0 + M \cdot \omega = \frac{d}{dt} \int_V a(r) dV + \tau_z S v_0 + \tau_k S R_1 \omega, \quad (1)$$

где $a(r)$ – удельная энергия деформации грунта, V – объем очага деформации, τ_z – касательные напряжения (удельные силы трения) на поверхности колонки S в направлении поступательного движения, τ_k – удельные силы трения на поверхности R_1 колонки и ребер (катанки), возникающие при вращательном движении, v_0, ω – линейная и угловая скорости колонки. При отсутствии «пробуксовки» угловая и линейные скорости связаны соотношением $\omega = 2\pi v_0 / h$, где h – шаг винтовой наваренной катанки.

В ходе решения требуется определить объем сжимаемого грунта, степень его сжатия по мере удаления от оси колонки и необходимую энергию (мощность) внешних воздействий (источников) в виде требуемых усилий или момента в зависимости от геометрических параметров и глубины внедрения колонки, сжимаемости грунта, условий трения и пр.

Будем считать движение колонки установившимся, распределение плотности перед колонкой равномерным ($\rho_0 = const$). Течение принимаем плоским ортогональным оси колонки, т. е. перемещения частиц грунта в направлении оси колонки отсутствуют. Радиусы цилиндрических поверхностей колонки и гра-

ницы области деформации обозначены через R_1 и R_2 . На цилиндрической поверхности R_2 плотность грунта сохраняет свое первоначальное значение ρ_0 , а на поверхности трубы (ребрами катанки пренебрегаем) плотность увеличивается до максимального значения ρ_m .

За время dt масса грунта $dm = \rho_0 \pi R_2^2 dz$ в слое толщиной « dz » перед колонкой переходит на цилиндрическую часть (с навитой катанкой) с радиусом R_1

$$dm = 2\pi dz \int_{R_1}^{R_2} \rho(r) r dr = \pi dz \int_{R_1}^{R_2} \rho(r) dr^2, \quad (2)$$

где $\rho(r)$ - плотность грунта в зоне сжатия, зависит от радиуса слоя « r ». Следовательно, для выполнения условия сохранения массы должно выполняться равенство

$$\rho_0 R_2^2 = \int_{R_1}^{R_2} \rho(r) dr^2. \quad (3)$$

Предположим, что плотность грунта после внедрения колонки изменяется вдоль радиуса по квадратичному закону и принимает значения $\rho = \rho_m$ при $r = R_1$ и $\rho = \rho_0$ при $r = R_2$

$$\rho = \rho_m + \frac{\rho_0 - \rho_m}{R_2^2 - R_1^2} (r^2 - R_1^2). \quad (4)$$

Для принятого закона распределения плотности (4) в правой части условия (3) получаем

$$\int_{R_1}^{R_2} \left[\rho_m + \frac{\rho_0 - \rho_m}{R_2^2 - R_1^2} (r^2 - R_1^2) \right] dr^2 = \rho_m (R_2^2 - R_1^2) + \frac{\rho_0 - \rho_m}{R_2^2 - R_1^2} \left[(R_2^4 - R_1^4) / 2 - R_1^2 (R_2^2 - R_1^2) \right]$$

или

$$\int_{R_1}^{R_2} \left[\rho_m + \frac{\rho_0 - \rho_m}{R_2^2 - R_1^2} (r^2 - R_1^2) \right] dr^2 = \rho_m (R_2^2 - R_1^2) + \frac{\rho_0 - \rho_m}{2} (R_2^2 - R_1^2) = \frac{\rho_0 + \rho_m}{2} (R_2^2 - R_1^2).$$

Условие сохранения массы (3) принимает вид

$$\frac{\rho_0 + \rho_m}{2} (R_2^2 - R_1^2) = \rho_0 R_2^2 \quad \text{или} \quad \rho_m = \rho_0 \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \geq 1. \quad (5)$$

Таким образом, после прохождения колонки плотность в окружающем её массиве грунта будет изменяться по соотношению

$$\rho = \rho_0 \frac{R_1^4 - 2r^2 R_1^2 + R_2^4}{(R_2^2 - R_1^2)^2}. \quad (5a)$$

Изменение объема V и плотности ρ связано условием сохранения массы бесконечно малой частицы dm

$$dm = \rho dV = \rho_0 dV_0. \quad (6)$$

В механике сплошной среды обычно используют относительное изменение объема частицы η . При исходном и текущем значениях объема dV_0 и dV получаем

$$\eta = 3\varepsilon = \frac{dV - dV_0}{dV_0} = \frac{dV}{dV_0} - 1 = \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \leq 0$$

или

$$\eta(r) = 3\varepsilon(r) = \frac{(\rho_0 - \rho_m)(R_2^2 - r^2)}{\rho_m(R_2^2 - r^2) + \rho_0(r^2 - R_1^2)} \leq 0, \quad (7)$$

где ε - компонента шарового тензора деформаций, которая связана с гидростатическим напряжением σ законом упругого изменения объема [3]

$$\sigma = 3K\varepsilon,$$

где K - модуль объемной упругости.

Соотношение (7) можно также записать в виде

$$\eta(r) = 3\varepsilon(r) = \frac{-2R_1^2(R_2^2 - r^2)}{R_1^4 - 2r^2R_1^2 + R_2^4} \leq 0. \quad (7a)$$

Затраты внешней энергии на сжатие грунта при перемещении колонки в осевом направлении на величину dz составят

$$A = 2\pi(dz) \int_r a(r)rdr. \quad (8)$$

Удельная энергия изменения объема [4]

$$a(r) = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon = \frac{3}{2}K\varepsilon^2 = \frac{1}{6}K(3\varepsilon)^2 \quad (9)$$

в соответствии с уравнением (7) зависит от радиальной координаты r слоя грунта. Общую энергию находим интегрированием удельной энергии по объему очага деформации (сжатия) $R_1 \leq r \leq R_2$. Для полного оборота колонки с осевым смещением на шаг навивки h потребуется энергия

$$A_h = 2\pi h \int_{R_1}^{R_2} a(r)rdr = \pi h \int_{R_1}^{R_2} a(r)dr^2 = \frac{\pi Kh}{6} \int_{R_1^2}^{R_2^2} \frac{(\rho_0 - \rho_m)^2 (R_2^2 - r^2)^2}{[\rho_m R_2^2 - \rho_0 R_1^2 + (\rho_0 - \rho_m)r^2]^2} dr^2. \quad (10)$$

Для удобства интегрирования переходим к новой переменной $r^2 \equiv x$

$$\frac{6}{\pi Kh} A_h = \tilde{A}_h = \int_{x_1}^{x_2} (\rho_0 - \rho_m)^2 \frac{R_2^4 - 2R_2^2 x + x^2}{(a + bx)^2} dx, \quad (11)$$

здесь использованы обозначения

$$a = \rho_m R_2^2 - \rho_0 R_1^2, \quad b = \rho_0 - \rho_m, \quad x_1 = R_1^2, \quad x_2 = R_2^2. \quad (11a)$$

Интеграл в правой части уравнения (11) преобразуется к трем табличным [6] с окончательным результатом интегрирования

$$\tilde{A}_h = b^2 \left\{ R_2^4 \frac{-1}{b(a+bx)} - 2R_2^2 \frac{1}{b^2} \left[\frac{a}{a+bx} + \ln |a+bx| \right] + \frac{1}{b^2} \left[x - \frac{a}{b} \left(\frac{a}{a+bx} + 2 \ln |a+bx| \right) \right] \right\} \Bigg|_{x_1}^{x_2}$$

После подстановки пределов и преобразования получаем

$$\begin{aligned} \tilde{A}_h &= R_2^4 b^2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{(a+bx_1)(a+bx_2)} + 2R_2^2 \frac{ab(R_2^2 - R_1^2)}{(a+bx_1)(a+bx_2)} - 2R_2^2 \ln \left| \frac{a+bx_2}{a+bx_1} \right| + \\ &+ (R_2^2 - R_1^2) + a^2 \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{(a+bx_1)(a+bx_2)} - 2 \frac{a}{b} \ln \left| \frac{a+bx_2}{a+bx_1} \right| \\ \tilde{A}_h &= (R_2^2 - R_1^2) + (R_2^4 b^2 + 2abR_2^2 + a^2) \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{(a+bx_1)(a+bx_2)} - 2(R_2^2 + \frac{a}{b}) \ln \left| \frac{a+bx_2}{a+bx_1} \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{A}_h &= (R_2^2 - R_1^2) + (a + bR_2^2)^2 \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{(a + bx_1)(a + bx_2)} - 2(R_2^2 + \frac{a}{b}) \ln \left| \frac{a + bx_2}{a + bx_1} \right| \\ \tilde{A}_h &= (R_2^2 - R_1^2) + (a + bx_2) \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{(a + bx_1)} - 2(R_2^2 + \frac{a}{b}) \ln \left| \frac{a + bx_2}{a + bx_1} \right|\end{aligned}\quad (12)$$

С учетом соотношения (5) использованные выше функции (11а) принимают значения

$$a = \rho_m R_2^2 - \rho_0 R_1^2 = \rho_0 \frac{R_2^4 + R_1^4}{R_2^2 - R_1^2}, \quad b = \rho_0 - \rho_m = -2\rho_0 \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2},$$

$$a + bx_1 = \rho_0 \frac{R_1^4 + R_2^4}{R_2^2 - R_1^2} - 2\rho_0 \frac{R_1^4}{R_2^2 - R_1^2} = \rho_0 (R_2^2 + R_1^2),$$

$$a + bx_2 = \rho_0 \frac{R_1^4 + R_2^4}{R_2^2 - R_1^2} - 2\rho_0 \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} = \rho_0 (R_2^2 - R_1^2),$$

и выражение для интегральной энергии (12) преобразуется к виду

$$\tilde{A}_h = (R_2^2 - R_1^2) \frac{2R_2^2}{R_2^2 + R_1^2} + \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{R_1^2} \ln \left| \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2 + R_1^2} \right|. \quad (13)$$

$$\tilde{A}_h = 2R_2^2 \frac{a + bx_2}{a + bx_1} + \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{R_1^2} \ln \left| \frac{a + bx_2}{a + bx_1} \right|.$$

В соответствии с экстремальными принципами механики сплошных сред [4, 5], зависимость мощности (энергии) внешних источников на основе любого кинематически возможного решения, удовлетворяющего условию сохранения массы и граничным условиям задачи в скоростях (или перемещениях), имеет экстремальный характер. Наличие экстремума функции (13) при изменении радиуса R_2 иллюстрируют графики на рис. 1.

Исходя из этого, радиус зоны сжатия R_2 может быть принят за варьируемую переменную и с достаточной точностью найден из условия экстремума энергии (13). Приравнявая нулю производную

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tilde{A}_h}{\partial R_2} &= 2R_{2m} \frac{2R_{2m}^2}{R_1^2 + R_{2m}^2} + 4R_{2m} \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_1^2 + R_{2m}^2} - 4R_2^3 \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{(R_1^2 + R_{2m}^2)^2} + \\ &+ 4R_{2m} \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_1^2} \ln \left(\frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_1^2 + R_{2m}^2} \right) + 4R_2 \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_1^2 + R_{2m}^2} = 0\end{aligned}\quad (14)$$

получаем трансцендентное уравнение с одной неизвестной R_{2m} . Решение достаточно просто можно получить численным или графическим способами, определяя точки пересечения функции

$$\begin{aligned}f(R_2) &= \frac{\partial \tilde{A}_h}{\partial R_2} = 2R_2 \frac{2R_2^2}{R_1^2 + R_2^2} + 4R_2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 + R_2^2} \\ &- 4R_2^3 \frac{R_2^2 - R_1^2}{(R_1^2 + R_2^2)^2} + 4R_2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2} \ln \left(\frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 + R_2^2} \right) + 4R_2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 + R_2^2}\end{aligned}\quad (14a)$$

с осью абсцисс. Графики функции (14а) для исследуемых значений R_1 приведены на рис. 2.

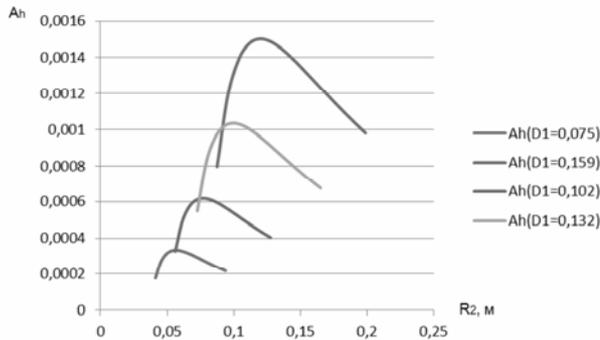


Рис. 1. Экстремальный характер зависимости энергии продвижения бура \tilde{A}_h в зависимости от радиуса R_2 , отделяющего очаг деформации грунта от остального массива грунта

$$A_h = \frac{1}{6} \pi K h \left[2R_{2m}^2 \frac{a + bx_{2m}}{a + bx_1} + \frac{(R_{2m}^2 - R_1^2)^2}{R_1^2} \ln \left| \frac{a + bx_{2m}}{a + bx_1} \right| \right] \quad (15)$$

или

$$A_h = \frac{1}{6} \pi K h \left[2R_{2m}^2 \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_{2m}^2 + R_1^2} + \frac{(R_{2m}^2 - R_1^2)^2}{R_1^2} \ln \left| \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_{2m}^2 + R_1^2} \right| \right]. \quad (15a)$$

График изменения относительной плотности грунта в окрестности колонки приведен на рис. 4, из которого следует, что плотность грунта на поверхности колонки ρ_m примерно в 2,5 раза превышает его начальное значение ρ_0 .

Отношению радиусов $R_{2m}/R_1 = 1,51$ соответствует энергия, затрачиваемая на перемещение колонки на один шаг навивки, $A_h = 0,238\pi K h R_1^2 / 6 \approx 0,04\pi K h R_1^2$. Для установившегося процесса ее может обеспечить осевое усилие (при отсутствии вращающего момента M) $Q = 0,126 K R_1^2$ или момент (при отсутствии осевого усилия Q) $M = 0,02 K h R_1^2$, где h – шаг винтовой навивки ребер (катанки).

Использованные в работе для расчетов энергии, усилий и моментов свойства грунтов взяты из работ [7, 8], частично были подтверждены исследованиями с применением одометров, стабилометров и прессиометров [9].

При расчете энергии, затрачиваемой на преодоление сил трения, значения напряжений τ_z и τ_k принимали равными (0,7 ... 3,5) МПа, модуль Юнга и другие свойства приведены в табл. 1.

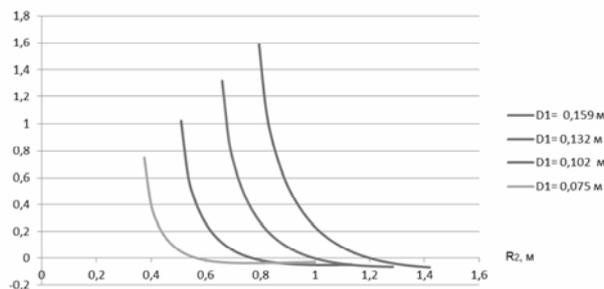


Рис. 2. Графический метод определения условий экстремума функции (13)

Таблица 1

Механические свойства горных пород

Свойство и размерность	Глина	Супесь
Показатель текучести брм, стр. 109	<0 >1,0	0 и >0
Плотность, т/м ³ =	2,71-2,76	
Модуль сдвига тс/м ² *град	0,5	0,05
Коэффициент Пуассона	0,3 0,42	0,35
Модуль Юнга, ГПа	0,016-0,05	
Предел прочности на сжатие, МПа	1,5-7,0	меньше 4
Предел прочности при растяжении, МПа	0,1-0,4	
Модуль объемной упругости, МПа	13...104 МПа	
Удельное сцепление по ГОСТ 30416-96	Мокрая, влажная-сухая глина 1-200 кПа Жирная 0,85-3,3 кгс/см ²	
Предел текучести на сдвиг, МПа	0,7-3,5	

Зависимость осевых сил от диаметра колонки и глубины внедрения имеет вид как на рис. 5 и 6 (для учета трения приняты касательные напряжения 0,01МПа).

$$Q_0 = \frac{1}{6} \pi K \left[2R_{2m}^2 \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_{2m}^2 + R_1^2} + \frac{(R_{2m}^2 - R_1^2)^2}{R_1^2} \ln \left| \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_{2m}^2 + R_1^2} \right| \right], \quad (16)$$

$$Q = Q_0 + \pi \tau_r D_k H, \quad (17)$$

где D_k – приведенный диаметр колонки (с учетом приваренной катанки), H – глубина внедрения колонки, м.

Зависимость крутящего момента $M_{кр}$ при том же значении предельных касательных напряжений приведена рис. 7.

$$M_{кр} = \frac{1}{12} Kh \left[2R_{2m}^2 \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_{2m}^2 + R_1^2} + \frac{(R_{2m}^2 - R_1^2)^2}{R_1^2} \ln \left| \frac{R_{2m}^2 - R_1^2}{R_{2m}^2 + R_1^2} \right| \right] + \tau_r D_k Hh \quad (18)$$

При одновременном приложении осевого усилия и крутящего момента энергетическое уравнение принимает вид

$$Q + \frac{2\pi}{h} M = Q_0 + \tau_{тек} \pi D_k H \quad (19)$$

где Q_0 – осевое усилие, требуемое для продвижения колонки при отсутствии трения и крутящего момента, рассчитываемое по уравнению (16), H – глубина погружения колонки.

Для проверки соответствия предлагаемой математической модели реальным процессам были проведены экспериментальные исследования. В качестве грунта использовали глину и супесь различной влажности.

Так как целью экспериментальных исследований было не выявление общих закономерностей процесса, а проверка адекватности математической модели реальным процессам внедрения оребренной колонки в различные среды, эксперименты проводили при пяти различных значениях основных геометрических характеристик колонки и физических свойствах среды с трехкратным повторением каждого эксперимента и усреднением конечных результатов для усилий и моментов. Конкретные значения параметров, использованные в экспериментах, приведены в табл. 1 и на рис. 1-6.

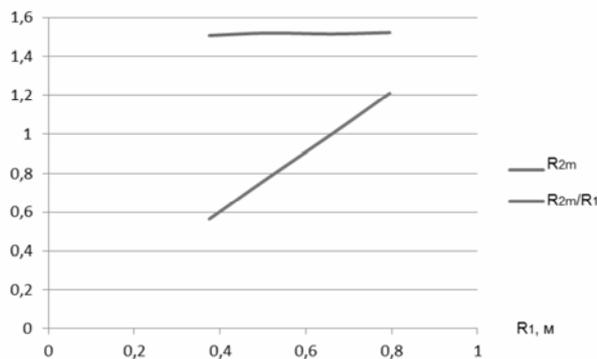


Рис. 3. Абсолютные R_{2m} и относительные R_{2m}/R_1 значения радиуса R_2 при экстремуме энергии \tilde{A}_h .

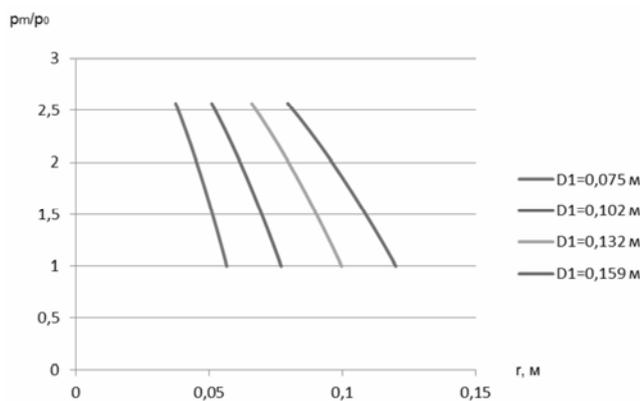


Рис. 4. Изменение относительной плотности грунта в окрестности бура.

Как следует из предлагаемой модели и экспериментальных наблюдений, соотношение угловых и осевых перемещений зависит от прилагаемых усилий и крутящего момента. При отсутствии пробуксовки должно выполняться условие

$$H = \frac{h}{2\pi} \varphi . \quad (20)$$

На графике в системе координат $\varphi - H$ это уравнение соответствует прямой, проходящей через начало координат, угол наклона которой определяет производная $dH/d\varphi = h/2\pi$.

При пробуксовке (проскальзывании в окружном направлении) она будет трансформироваться в кривую, расположенную под этой прямой. Если же прикладывать повышенные осевые усилия (по сравнению с крутящим моментом), тогда вместо пробуксовки может возникнуть опережающее продвижение в осевом направлении, кривая

будет располагаться выше прямой (20). При полном отсутствии поворота колонки она будет перемещаться в осевом направлении только за счет осевого усилия, кинематическая диаграмма будет совпадать с осью ординат « H ».

С учетом соотношения нормальных и касательных (на поверхности колонки) напряжений, требуемых для деформации грунта по описываемому закону (последние в 3-4 раза выше), целесообразно прежде всего обеспечивать требуемые осевые усилия, а для снижения трения на внешней поверхности дополнительно использовать вращательное движение колонки, не обязательно согласующееся с осевым перемещением колонки за счет «пробуксовки».

Геометрические характеристики используемых в экспериментах труб приведены в табл. 2.

Результаты экспериментальных исследований при внедрении колонки диаметром $D_k = 0,102$ м в глину и супесь при одновременном приложении усилий и моментов приведены на рис. 8.

Таблица 2.

Внешний диаметр трубы, м	0,075	0,102	0,132	0,159
Толщина стенки, м	0,006	0,006	0,006	0,006
Внутренний диаметр, м	0,063	0,090	0,120	0,147
Площадь сечения, м ² ·10 ⁴	13,006	18,096	23,750	28,840
Момент инерции, м ⁴ ·10 ⁶	1,560	4,186	9,448	16,904
Момент сопротивления м ³ ·10 ⁶	41,594	82,069	143,150	212,626

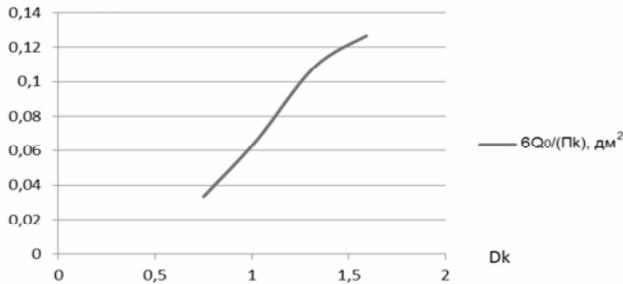


Рис. 5. Зависимость осевого усилия Q_0 от диаметра бура (при отсутствии момента M_0)

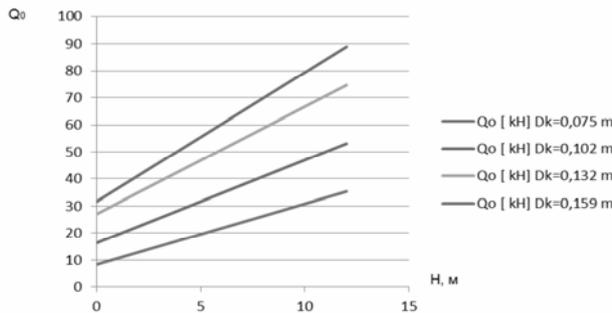


Рис. 6. Зависимость осевого усилия Q_0 от диаметра колонки D_k и глубины внедрения H (при отсутствии момента M_0) $K=50$ Мпа, $\tau_{tr} = 0,01$ МПа

Соотношение прикладываемых осевых усилий и крутящего момента влияет на мощность сопровождающих перемещение колонки сил трения. Так как задачей модели является определение верхней оценки мощности (усилия Q и момента $M_{кр}$), величину сил трения следует определять по максимально возможным значениям касательных напряжений, соответствующих условию возникновения пластического течения,

$$\tau_k = \tau_z = \tau_{iek} = \sigma_{iek} / \sqrt{3}. \quad (21)$$

Таким образом, по мере внедрения колонки вглубь массива грунта передаваемая от внешних источников мощность должна возрастать в соответствии с уравнением (19).

С учетом нормальных $\sigma_z = Q/F$ и касательных $\tau_{кр} = M/W_p$ напряжений,

где $F_0 = \frac{\pi D^2}{4}(1 - d^2/D^2)$, $W_p = \frac{\pi D^3}{16}(1 - d^4/D^4)$ - площадь поперечного сечения и полярный момент сопротивления трубы, соответственно, для оценки прочности колонки следует использовать гипотезу прочности удельной энергии изменения формы [9] по эквивалентным напряжениям

$$\sigma_{экив} = \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_{кр}^2} \leq [\sigma]. \quad (22)$$

В экспериментальных исследованиях использовали бурильные трубы производства Первоуральского трубного завода с группой прочности «Д».

Химический состав и основные механические характеристики [10, 11, 12] приведены в табл. 3.

Как следует из графиков на рис. 5-8, увеличение любого из факторов (осевое усилие или крутящий момент) допускает возможность снижения второго фактора без передачи в систему избыточной энергии.

Таблица 3.

№№	Марка стали	%C	%Mn	%M	%V	σ_s , МПа	δ %
1	32Г2МА	0,29-0,34	1,15-1,35	0,20-0,25	-	400	14,3
2	32Г2ФА	0,29-0,34	1,15-1,35	-	0,12-0,17	450	

Таблица 4

h= [м]	0	5	10	11	12	13	14	15
Q_0 [кН] Dk=0,075 м	8,35	19,60	30,85	33,10	35,35	37,60	39,85	42,10
$M_{кр}$ [кНм] Dk=0,075 м	1,25	4,63	8,00	8,68	9,35	10,03	10,70	11,38
σ_0 МПа	6,42	15,07	23,72	25,45	27,18	28,91	30,64	32,37
$\tau_{кр}$ МПа	30,13	111,27	192,41	208,64	224,87	241,10	257,33	273,55
$\sigma_{экв}$, МПа	52,58	193,31	334,11	362,27	390,43	418,59	446,75	474,91

Изменение как усилий, так и крутящих моментов от диаметра буровой колонки в первом приближении можно считать линейными функциями. Такой же вид функции можно распространить и на зависимость энергосиловых факторов от глубины погружения колонки (рис. 5, 6 и 7). Шаг навивки катанки практически не влияет на энергетические характеристики. Вместе с тем, для практического применения можно рекомендовать отношение $h/D_1 \approx 1$, которое соответствует минимальному значению момента.

Результаты расчета на прочность для трубы $Dk=0,075$ м при внедрении колонки в глину на глубину до 15 м приведены в табл. 4.

Как следует из таблицы, особо опасными с точки зрения прочности являются касательные напряжения от крутящего момента и поэтому надо стремиться по возможности использовать для продвижения колонки вглубь массива осевые нагрузки, а крутящий момент и связанное с ним вращение колонки должны способствовать проникновению влаги на поверхность колонки и, соответственно, снижению трения. Снижению трения также должна способствовать выдавливаемая из грунта в водонесных пластах жидкость. Возможна также дополнительная принудительная подача воды на поверхность колонки через центральную полость.

Сопоставление результатов расчета с опубликованными [1, 2, 6, 7, 15] и экспериментальными данными позволяет утверждать, что предлагаемую математическую модель можно использовать при расчете усилий и моментов для конструк-

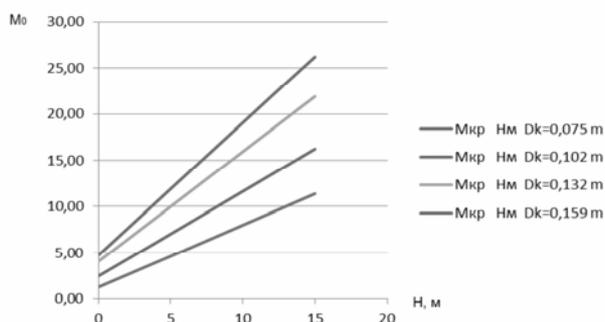


Рис. 7. Зависимость крутящего момента M_0 от диаметра колонки и глубины её внедрения (при отсутствии осевого усилия Q_0)

ций колонок, не предусматривающих перемещение грунта внутри полости трубы. Если такие колонки ориентированы для небольших глубин, тогда при их изготовления можно использовать стали обыкновенного качества, при этом применение сварки для закрепления катанки на внешнем контуре не будет способствовать существенному снижению механических характеристик материала трубы.

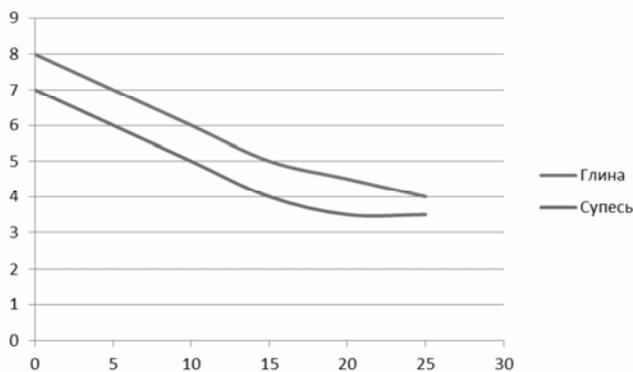


Рис. 8. Зависимость крутящего момента от осевого усилия ($D_k = 0,102$ м, $h/D_k = 1$)

Несоответствие расчетных и фактических значений мощности можно объяснить погрешностью используемых в расчетах физических свойств среды. В частности, модуль объемной упругости суглинков в зависимости от влажности может колебаться в достаточно большом диапазоне, как это отмечено в табл. 1.

Другим источником погрешности является неоднородность среды, состоящей из твердотельных

фрагментов различных размеров, более мелких фракций инородных включений и влаги, неоднородно распределенной по объему очага деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмызников К.П. Определение усилия подачи на буровой инструмент в зависимости от направления скважин. www.spmi.ru/download/zgi/157/t157_hmyznikov_r.htm
2. [HTTP://WWW.drillingformulas.com/drilling-formulas-and-calculation-sheets/](http://WWW.drillingformulas.com/drilling-formulas-and-calculation-sheets/). www.petec.ru/docs/drillbench-russian.pdf Москва
3. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: МГУ, 1978. 288 с.
4. Алюшин Ю.А. Энергетические основы механики. Учеб. пособ. для вузов. – М.: Машиностроение, 1999. – 192 с: ил.
5. Ланцош К. Вариационные принципы механики. М.: Наука, 1965. 450 с.
6. Смолянский М.Л. Таблицы неопределенных интегралов. М.: Физматгиз, 1963. 112 с.
7. Механика грунтов. http://www.geotek.ru/publications/public3/M_4.php
8. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. Изд-во литературы по строительству. М.: 1971
9. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Физматгиз, 1962, 536 с.
10. <http://www.fundamentproekt.ru>
11. <http://comex.dp.ua/katalog/tzag.htm>
12. <http://www.pntz.ru/nomenklatura.rhtm>
13. <http://metalopt.ru/production/metaltubes/chemistry/drill-pipes/>
14. Физические свойства бурильных труб <http://www.geotek.ru/learning/report>
15. Патент РФ №84869 на полезную модель «Устройство для замораживания грунтов при строительстве подземных сооружений». Авторы: Корчак А.В., Шуплик М.Н., Никитушкин Р.А., Никитушкин А.А. Приоритет от 17.03. 2009 г., опубликован в бюллетене №20 от 20.07.2009 г. **ПАТ**

Коротко об авторах

Корчак А.В. – профессор, доктор технических наук, ректор МГГУ, заведующий кафедрой СПСиШ, E-mail: kafedrasp@gmail.com

Алюшин Ю.А. - профессор, доктор технических наук, кафедра ТПМ,

Никитушкин Р.А. – аспирант кафедры СПСиШ,

Московский государственный горный университет,

Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru