

ПРОСТЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПРИ БУРЕНИИ НА АКВАТОРИИ (I)

SIMPLE SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF DRILL STRING STRESS-STRAIN STATE WHEN DRILLING IN THE WATER AREA (I)

А. А. Котов
Alexey A. Kotov

Мурманский государственный
технический университет,
г. Мурманск,
Российская Федерация

Murmansk State Technical
University, Murmansk,
Russian Federation

Б. А. Коротаев
Boris A. Korotaev

Мурманский государственный
технический университет,
г. Мурманск,
Российская Федерация

Murmansk State Technical
University, Murmansk,
Russian Federation

Ф. Н. Янгиров
Farit N. Yangirov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum Technological
University, Ufa, Russian Federation

Известно, что точные аналитические решения задачи о напряженно-деформированном состоянии бурильной колонны при бурении на акватории с учетом силовых и дислокационных воздействий на нее связаны с существенными математическими проблемами и весьма неудобны в практическом применении вследствие своей громоздкости. Здесь представлен достаточно простой вариант приближенного аналитического решения этой задачи при отсутствии поперечных силовых воздействий, а также известный классический способ решения методом сил при действии поперечных нагрузок. Вследствие своей простоты и достаточной точности результатов эти методы решения могут быть рекомендованы для широкого практического применения.

It is known that accurate analytical solutions to the problem of the stress-strain state of the drill string when drilling in the water area, taking into account the force and dislocation effects on it, are associated with significant mathematical problems and are very inconvenient in practical application due to their bulkiness. Here we present a simple version of the approximate analytical solution of this problem in the absence of transverse forces, as well as a well-known classical method of solving the problem by the method of forces under the action of transverse loads. Due to their simplicity and sufficient accuracy of results, these solutions can be recommended for wide practical application.

Постановка задачи

Рассматривается напряженно-деформированное состояние бурильной колонны при бурении на акватории с буровой платформы. Учитываются все возможные на нее воздействия: горизонтальное смещение Δ платформы относительно забоя; угол волнового крена платформы α ; боковое воздействие q , создаваемое перемещением водных масс; собственный вес колонны g (с учетом выталкивающего действия воды); продольное силовое воздействие N_d , создающее натяжение колонны на забое скважины (рисунок 1). Настоящее исследование является продолжением и обобщением работы [1], где учитыва-

лось только горизонтальное кинематическое воздействие Δ .

На рисунке 1 стрелками показаны кинематические и силовые воздействия, реактивные силы показаны жирными стрелками. Вследствие этих воздействий колонна искривляется, и в ней возникает напряженное состояние. Поскольку величина напряжений в материале колонны ограничена условием его прочности, то необходимо выяснить величину действующих в колонне усилий в зависимости от задаваемых воздействий. Точное решение этой задачи [2–4] связано с большими математическими проблемами и имеет настолько громоздкую форму, что ее очень затруднительно

Ключевые слова

бурильная колонна; платформа; воздействия; дифференциальное уравнение; метод сил; усилия

Key words

drill string; platform; impacts; differential equation; force method; forces

применять в практических инженерных целях. Поэтому здесь рассматривается возможность альтернативного решения, которое могло бы быть достаточно просто реализовано и привело бы к реальному практически значимому результату.

Решение задачи. Общий случай дифференциального уравнения

Здесь, предполагая линейные и угловые перемещения в рассматриваемом объекте малыми, для решения поставленной задачи используем известное приближенное дифференциальное уравнение оси изогнутого стержня:

$$EJy'' = -M(x). \quad (1)$$

Для изгибающего момента в правой части (1), согласно схеме на рисунке 1, получается следующее выражение:

$$M(x) = -M_A + Q_A x - N_A y - \int_0^x g(y-v) du - 0,5qx^2. \quad (2)$$

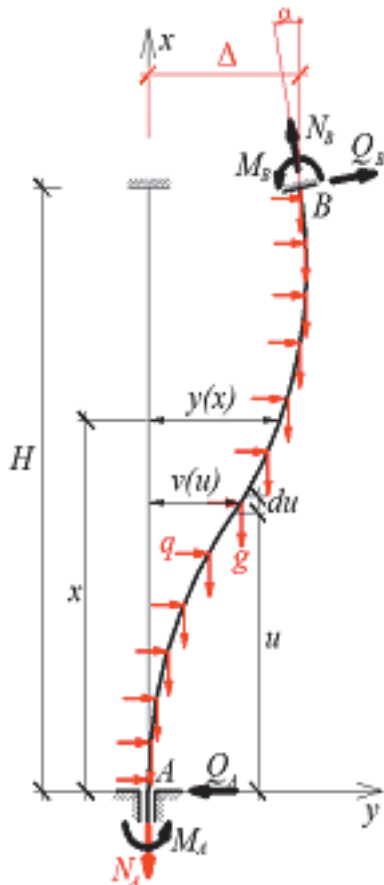


Рисунок 1. Расчетная схема буровой колонны

Подставляем (2) в (1):

$$EJy'' = M_A + Q_A x - N_A y - \int_0^x g(y-v) du + 0,5qx^2. \quad (3)$$

Для устранения интеграла в уравнении (3) дифференцируем это уравнение:

$$EJy''' = -Q_A - N_A y' + gxy' + qx. \quad (4)$$

Отсюда далее получаем:

$$\xi = \frac{x}{H}, \quad \eta = \frac{y}{\Delta}. \quad (5)$$

Тогда

$$y'(x) = \frac{\Delta}{H} \eta'(\xi); \quad y''(x) = \frac{\Delta}{H^2} \eta''(\xi); \quad (6)$$

$$y'''(x) = \frac{\Delta}{H^3} \eta'''(\xi).$$

Подставляя (5) и (6) в (4), получаем

$$EJ \frac{\Delta}{H^3} \eta'''(\xi) - (N_A + gH\xi) \frac{\Delta}{H} \eta'(\xi) - qH\xi + Q_A = 0.$$

Решим последнее уравнение относительно старшей производной:

$$\eta'''(\xi) = \left(\frac{N_A H^2}{EJ} + \frac{gH^3}{EJ} \xi \right) \eta'(\xi) + \frac{qH^3}{EJ} \frac{H}{\Delta} \xi - \frac{Q_A H^2}{EJ} \frac{H}{\Delta}. \quad (7)$$

Введем безразмерные параметры

$$\frac{N_A H^2}{EJ} \equiv \omega; \quad \frac{gH^3}{EJ} \equiv \kappa; \quad \frac{qH^3}{EJ} \equiv \lambda; \quad \frac{Q_A H^2}{EJ} \equiv \chi; \quad \frac{\Delta}{H} \equiv \delta. \quad (8)$$

Введем также новую искомую функцию:

$$\eta'(\xi) \equiv \psi(\xi). \quad (9)$$

Тогда с учетом (8) и (9) уравнение (7) примет вид

$$\psi''(\xi) = (\omega + \kappa\xi)\psi(\xi) + \frac{\lambda}{\delta}\xi - \frac{\chi}{\delta}. \quad (10)$$

В уравнении (10) функция

$$\psi(\xi) = \eta'(\xi) = \frac{H}{\Delta} y'(x) = \frac{1}{\delta} \varphi(x) \quad (11)$$

имеет смысл угла $\varphi(x)$ отклонения продольной оси буровой колонны от вертикали. Поэтому граничные условия для этого уравнения в соответствии со схемой на рисунке 1 и соотношением (11) можно записать следующим образом:

$$\psi|_{\xi=0} = 0, \quad \psi|_{\xi=1} = -\frac{\alpha}{\delta}. \quad (12)$$

Для числового решения уравнения (10) в среде WolframMathematica удобнее оба граничных условия записать как начальные, т.е. при $\xi = 0$ нужно определить не только функцию ψ , но и ее производную ψ' . Из формул (9), (6) и (1) следует

$$\psi'(\xi) = \eta''(\xi) = y''(x) \frac{H^2}{\Delta} = -\frac{M(x)}{EJ} \cdot \frac{H^2}{\Delta} = -\frac{H}{\delta EJ} M(x).$$

Тогда начальные условия принимают следующий вид:

$$\psi|_{\xi=0} = 0, \quad \psi'(\xi)|_{\xi=0} = -\frac{H}{\delta EJ} M_A. \quad (14)$$

В уравнении (10) и начальных условиях (14) неизвестными параметрами являются

величина χ , выражаемая через Q_A (8), и момент в забое M_A . В процессе итераций при решении уравнения (10) исходя из начальных условий (14) эти параметры нужно варьировать таким образом, чтобы выполнить граничное условие наверху

$$\psi|_{\xi=1} = -\frac{\alpha}{\delta}. \quad (15)$$

Поскольку варьируемых параметров два, то процедура варьирования должна быть некоторым образом упорядочена. Прежде всего должен быть определен некоторый диапазон варьирования. В отношении величины Q_A такой диапазон установить достаточно трудно, а изгибающий момент M_A можно изменять в некоторой окрестности допустимого для него значения из условия прочности бурильной колонны на изгиб. Это допустимое значение момента [М] определяется очевидным соотношением

$$[M] = \frac{J[\sigma]}{D/2}, \quad (16)$$

где D — наружный диаметр бурильной колонны;

J — момент инерции ее поперечного сечения;

$[\sigma]$ — допустимое напряжение (расчетное сопротивление).

Тогда момент M_A можно целенаправленно изменять в практически значимом диапазоне, например от $-1,5$ [М] до $-0,5$ [М], и для каждого из рассматриваемых для него значений искать значение Q_A , удовлетворяющее граничному условию (15).

Реализуем эту процедуру в среде WolframMathematica, рассматривая некоторый конкретный числовой пример. Примем следующие исходные данные: $H = 350$ м, $\Delta = 17$ м, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа урильная колонна — стальная труба диаметрами внешним $D = 127$ мм, внутренним $d = 108$ мм; $N_A = 1$ кН. Результаты получились следующими. При $M_A = -$ [М] из-

менение Q_A в четвертом знаке с 3023 Н до 3024 Н приводит к изменению решения с $+\infty$ до $-\infty$ (рисунок 2). Это означает, что в диапазоне поперечной силы от 0 до $+\infty$ при данном значении изгибающего момента на забое устойчивое решение этими удобными для реализации средствами комплекса WolframMathematica получить невозможно.

Аналогичные результаты получаются и при остальных значениях M_A в диапазоне от $-1,5$ [М] до $-0,5$ [М]. Это означает, что в среде WolframMathematica при решении дифференциального уравнения (10) с начальными условиями (14) невозможно получить результат, объективно отражающий действительное поведение колонны.

Ниже будет показано, что воздействие боковой нагрузки q может быть учтено отдельным достаточно простым расчетом. Поэтому в уравнении (10) слагаемым $\frac{\lambda}{\delta}\xi$, учитывающим действие боковой нагрузки, можно пренебречь в надежде, что это приведет к приемлемому решению уравнения. Однако и без учета q этого не происходит, числовое решение в среде WolframMathematica по-прежнему остается расходящимся.

Поскольку процедура решения дифференциальных уравнений с начальными условиями в среде WolframMathematica неизвестна, и повлиять на нее мы не можем, была сделана попытка составить и реализовать самостоятельную процедуру решения дифференциального уравнения (10) методом Эйлера. Эта процедура была реализована также в среде WolframMathematica. Ее результат оказался аналогичным результату стандартного решения: функция ψ уходит в бесконечность задолго до достижения аргументом ξ значения единица. Таким образом, можно сделать вывод, что численное решение уравнения (10) с использованием только начальных условий, т.е. путем реализации процедур Рунге-Кутты невозможно.

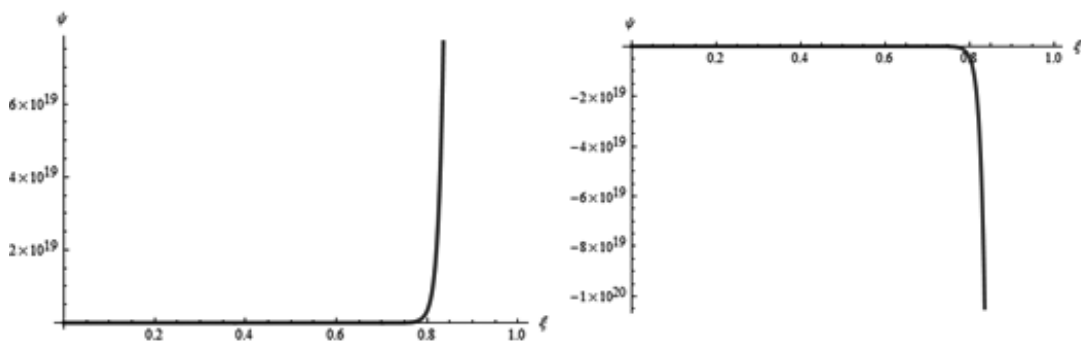


Рисунок 2. Неустойчивость числового решения дифференциального уравнения (10) с начальными условиями в среде WolframMathematica

Поэтому далее была предпринята попытка числового решения уравнения (10) в конечных разностях с граничными условиями (12). Такой способ решения поставленной задачи не может соответствовать цели формирования прикладного, достаточного простого метода расчета бурильных колонн на акватории, но может дать некоторое представление о том, каким это решение в принципе может быть. Результаты решения уравнения (10) в конечных разностях при дроблении области на 35 интервалов выглядят так, как это показано на рисунке 3.

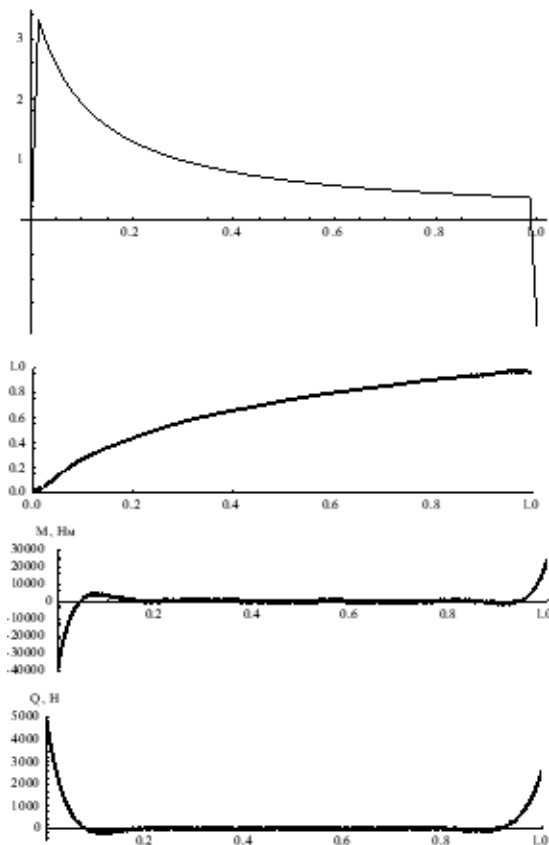


Рисунок 3. Результаты решения уравнения (10) без учета q методом конечных разностей

Решение задачи. Вариант без поперечной нагрузки с приближенным учетом собственного веса

В расчетной схеме на рисунке 1 равномерно распределенная по высоте поперечная нагрузка q создается движением водных масс. Маловероятно, что это воздействие является равномерным по глубине акватории. Поэтому предполагая далее учесть это боковое давление воды отдельным расчетом в более общем неравномерном варианте, исключим это воздействие из рассмотренного ранее перечня.

Тогда уравнение (10) с учетом (8) примет следующий вид:

$$\psi''(\xi) = (\omega + \kappa\xi)\psi(\xi) - \frac{\chi}{\delta}. \quad (17)$$

Далее аналогично тому, как это было сделано в работе [1], учитывая, что переменная ξ изменяется от 0 до 1, заменяем ее приближенно константой 0,5. Это делается для того, чтобы в линейном дифференциальном уравнении (17) избавиться от переменного коэффициента при искомой функции. В результате этого уравнение (17) примет следующий вид:

$$\psi''(\xi) - (\omega + 0,5\kappa)\psi(\xi) = -\frac{\chi}{\delta}. \quad (18)$$

Это неоднородное линейное уравнение второго порядка решаем стандартным методом. Обозначаем

$$\omega + 0,5\kappa \equiv \beta^2. \quad (19)$$

Тогда

$$\psi''(\xi) - \beta^2\psi(\xi) = -\frac{\chi}{\delta}. \quad (20)$$

Однородное уравнение

$$\psi''(\xi) - \beta^2\psi(\xi) = 0$$

в соответствии с корнями $k_{1,2} = \pm\beta$ характеристического уравнения $k^2 - \beta^2 = 0$ имеет общее решение

$$\psi_0 = C_1 e^{\beta\xi} + C_2 e^{-\beta\xi}.$$

Частное решение неоднородного уравнения (20) ищем в виде константы A из условия

$$-\beta^2 A = -\frac{\chi}{\delta}.$$

Откуда следует

$$A = \frac{\chi}{\delta\beta^2}. \quad (21)$$

В результате общее решение уравнения (18) принимает вид

$$\psi = C_1 e^{\beta\xi} + C_2 e^{-\beta\xi} + A. \quad (22)$$

Для определения констант C_1 и C_2 используем граничные условия (12). Они приводят к следующим уравнениям:

$$C_1 + C_2 + A = 0, \quad (23)$$

$$C_1 e^{\beta} + C_2 e^{-\beta} + A = \psi_1, \quad (24)$$

где

$$\psi_1 = -\frac{\alpha}{\delta}. \quad (25)$$

При этом в решении (22) параметр A также остается неопределенным, поскольку через формулы (21) и (8) он зависит от величины поперечного усилия в забое Q_A . Его определение еще впереди.

Далее для получения уравнения изогнутой оси колонны $\eta(\xi)$ в соответствии с (9) интегрируем (22):

$$\eta(\xi) = \frac{C_1 e^{\beta\xi} - C_2 e^{-\beta\xi}}{\beta} + A\xi + C_3. \quad (26)$$

Здесь для функции $\eta(\xi)$ должны выполняться следующие граничные условия:

$$\eta|_{\xi=0} = 0 \quad \eta|_{\xi=1} = 1. \quad (27)$$

Из них следует:

$$\frac{C_1 - C_2}{\beta} + C_3 = 0. \quad (28)$$

$$\frac{C_1 e^{\beta} - C_2 e^{-\beta}}{\beta} + A + C_3 = 1. \quad (29)$$

Решаем совместно уравнения (23), (24), (28) и (29) относительно констант C_1 , C_2 , C_3 и A . В результате получается следующее.

$$A = -C_1 - C_2;$$

$$C_3 = -\frac{C_1 - C_2}{\beta};$$

$$C_2 = \frac{[2(e^{\beta} - 1) - \beta] C_1 - \beta - \psi_1}{\beta}; \quad (30)$$

$$C_1 = \frac{\psi_1 \beta e^{\beta} - (\psi_1 + \beta)(e^{\beta} - 1)}{(e^{\beta} - 1)[(\beta - 2)e^{\beta} + \beta + 2]}.$$

Прямая подстановка выражений (30) в решения (22) и (26) привела бы к их неоправданной громоздкости. Поэтому оставим их в прежнем виде, а для получения числового результата придется просто выполнить очевидную последовательность действий в соответствии с полученными формулами.

Чтобы получить выражение для изгибающего момента, дифференцируем (22) и применяем формулу (13):

$$\eta''(\xi) = \psi'(\xi) = \beta(C_1 e^{\beta\xi} - C_2 e^{-\beta\xi}); \quad (31)$$

$$M(\xi) = -\frac{\delta EJ}{H} \eta''(\xi). \quad (32)$$

Используем далее общепринятое в строительной механике обозначение относительной изгибной жесткости:

$$\frac{EJ}{H} = i. \quad (33)$$

После этого выражение для момента становится очень простым:

$$M(\xi) = -i\delta\eta''(\xi). \quad (34)$$

Формулу для поперечного усилия получаем, дифференцируя момент:

$$Q(\xi) = -\frac{i\delta}{H} \eta'''(\xi). \quad (35)$$

Здесь

$$\eta'''(\xi) = \beta^2(C_1 e^{\beta\xi} + C_2 e^{-\beta\xi}). \quad (36)$$

Наконец, для продольного усилия справедлива формула

$$N(\xi) = N_A + gH\xi. \quad (37)$$

Для построения графиков функций $\psi(\xi)$, $\eta(\xi)$, $M(\xi)$, $Q(\xi)$ и $N(\xi)$ составлена программа в среде WolframMathematica. Результаты показаны на рисунке 4. На этом рисунке графики $\eta(\xi)$ и $M(\xi)$ показывают, что в соответствии с полученным приближенным решением заметные искривления буровой колонны имеют место только на малых участках у забоя и у поверхности акватории, а основная часть длины остается прямолинейной, хотя и наклонной. Эти концевые участки с искривлениями в более крупном масштабе показаны на рисунке 5.

Очевидно, что локальному размещению искривлений колонны соответствует большая потенциальная энергия деформации трубопровода, нежели равномерному их распределению по длине. Следовательно, изгибающие моменты в данном приближенном решении получаются несколько завышенными. В реальных практических расчетах это может быть отнесено в запас прочности буровой колонны.

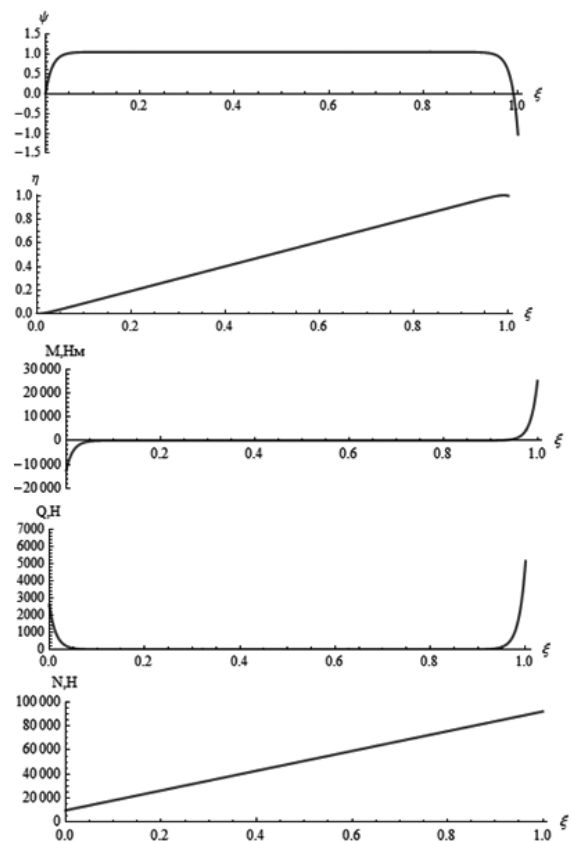


Рисунок 4. Результаты аналитического решения уравнения (18)

С другой стороны, из сравнения рисунков 3 и 4, результаты аналитического решения приближенного уравнения (18) качественно и количественно достаточно хорошо согласуются с результатами численного решения методом конечных разностей точного уравнения (10) без учета поперечной распределенной нагрузки. При этом аналитическое решение реализуется очень просто для любых числовых значений исходных данных. Поэтому приближенный аналитический вариант можно рекомендовать для использования в практических расчетах при проектировании буровых колонн на акватории.

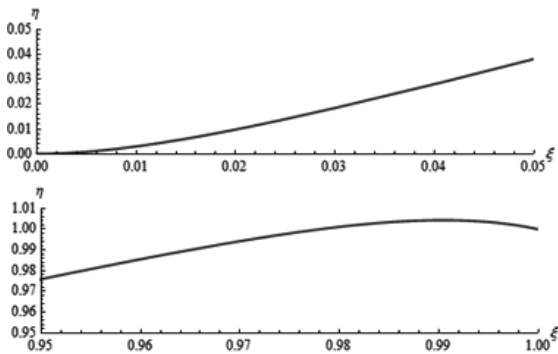


Рисунок 5. Искривления колонны на конечных участках

Решение задачи при воздействии поперечной нагрузки

Боковое воздействие q создается горизонтальными течениями и может быть не одинаковым по высоте буровой колонны. В этом случае его можно успешно аппроксимировать ступенчатой горизонтальной нагрузкой с разными интенсивностями. Тогда нужно иметь

решение задачи для равномерно распределенной нагрузки, расположенной на произвольном участке буровой колонны (рисунок 6). Решение этой задачи можно получить классическим методом сил. На рисунке 6 кроме исходной расчетной схемы показаны ее основная система, единичные и грузовая эпюры моментов в ней и итоговая эпюра изгибающих моментов. Приведем вкратце основные этапы решения задачи.

Канонические уравнения метода сил:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1F} = 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2F} = 0 \end{cases} \quad (38)$$

Коэффициенты при неизвестных, определенные путем перемножения единичных эпюр на рисунке 6:

$$\delta_{11} = \frac{H^3}{3EJ}; \delta_{12} = \delta_{21} = -\frac{H^2}{2EJ}; \delta_{22} = \frac{H}{EJ} \quad (39)$$

Свободные члены, определенные умножением единичных эпюр на грузовую (рисунок 6):

$$\Delta_{1F} = -B \frac{qH^4}{24EJ}; \Delta_{2F} = C \frac{qH^3}{6EJ};$$

$$B = \bar{l} \left[\bar{l}^2 (3 + \bar{a} + 3\bar{b}) + 4\bar{b}^2 (2 + \bar{a} + \bar{l}) + 6\bar{b}\bar{l} (1 + \bar{a}) \right]; \quad (40)$$

$$C = \bar{l} (\bar{l}^2 + 3\bar{b}\bar{l} + 3\bar{b}^2);$$

$$\bar{a} = \frac{a}{H}; \bar{b} = \frac{b}{H}; \bar{l} = \frac{l}{H}.$$

Решение канонических уравнений:

$$X_1 = DqH; X_2 = GqH^2.$$

$$D = \frac{B - 2C}{2}; G = \frac{3B - 8C}{12} \quad (41)$$

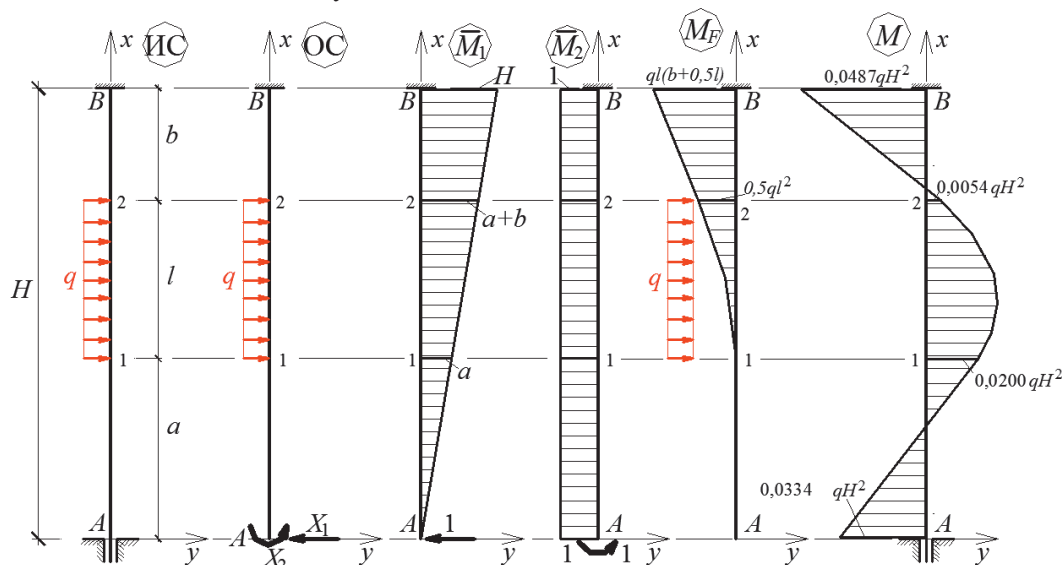


Рисунок 6. Расчетная схема колонны с произвольным боковым силовым воздействием. Эпюры моментов при решении задачи методом сил

Величины изгибающих моментов в характерных точках:

$$M_A = K_A q H^2; M_1 = K_1 q H; \quad (42)$$

$$M_2 = K_2 q H^2; M_B = K_B q H^2;$$

$$K_A = -G; K_1 = \bar{a}D - G; \quad (43)$$

$$K_2 = V - G - S; K_B = D - G - T;$$

$$S = 0,5\bar{l}^2; T = 0,5\bar{l}(2\bar{b} + \bar{l}); V = D(\bar{a} + \bar{l}). \quad (44)$$

Частный случай расчета при $\bar{a} = 0,4$, $\bar{l} = 0,35$, $\bar{b} = 0,25$ (пропорции, отраженные на рисунке 5) дает следующие результаты.

$$B = 0,35 \left[0,35^2 (3 + 0,4 + 3 \cdot 0,25) + 4 \cdot 0,25^2 \times \right. \\ \left. \times (2 + 0,4 + 0,25) + 6 \cdot 0,25 \cdot 0,35 (1 + 0,4) \right] = 0,667;$$

$$C = 0,35 (0,35^2 + 3 \cdot 0,25 \cdot 0,35 + 3 \cdot 0,25^2) = 0,200;$$

$$S = 0,5 \cdot 0,35^2 = 0,06125;$$

$$T = 0,5 \cdot 0,35 (2 \cdot 0,25 + 0,35) = 0,14875.$$

$$D = \frac{0,667 - 2 \cdot 0,200}{2} = 0,1335;$$

$$G = \frac{3 \cdot 0,667 - 8 \cdot 0,200}{12} = 0,0334;$$

$$V = 0,1335 (0,4 + 0,35) = 0,1001;$$

$$K_A = -0,0334; K_1 = 0,4 \cdot 0,1335 - 0,0334 = 0,0200;$$

$$K_2 = 0,1001 - 0,0334 - 0,0613 = 0,0054;$$

$$K_B = 0,1335 - 0,334 - 0,1488 = -0,0487.$$

Соответствующая итоговая эпюра моментов в относительных ординатах показана на рисунке 5 справа.

Если принять $q = 2$ Н/м, $H = 350$ м, то получим $qH^2 = 245000$ Нм, и изгибающие моменты в характерных точках примут следующие числовые значения:

$$M_A = -0,0334 \cdot 245000 = -8180 \text{ Нм};$$

$$K_1 = 0,0200 \cdot 245000 = 4900 \text{ Нм};$$

$$K_2 = 0,0054 \cdot 245000 = 1324 \text{ Нм};$$

$$K_B = -0,0487 \cdot 245000 = -11930 \text{ Нм}.$$

Эти изгибающие моменты при расчете буровой колонны должны быть алгебраически добавлены к тем моментам, которые были получены при аналитическом решении задачи с помощью приближенного уравнения (18) от кинематических и вертикальных силовых воздействий.

Заключение

Представленные выше решения задачи о внутренних усилиях в буровой колонне при

ее изгибе с растяжением рекомендуется использовать в такой последовательности. Сначала в соответствии с исходными данными по формулам (8) вычисляются δ , κ и ω . Затем по формуле (19) определяется параметр β , а по (25) — ψ_1 . Далее по формулам (30) определяются константы C_1 и C_2 , по которым в соответствии с (31) вычисляется кривизна $\eta''(\xi)$. Эта кривизна подставляется в формулу (32) для изгибающего момента $M(\xi)$, согласно которой и строится эпюра моментов от кинематических воздействий Δ и α и от силовых воздействий g и N_A . Этот алгоритм целесообразно реализовывать в какой-нибудь программной среде, с автоматическим построением эпюры $M(\xi)$. К этой эпюре от кинематических и силовых вертикальных воздействий нужно при необходимости добавить эпюру моментов от поперечного силового воздействия q , которая представлена крайним правым изображением на рисунке 5.

Поперечные усилия $Q(\xi)$, определенные по ходу решения представленных здесь задач формулой (35), при практических расчетах буровых колонн можно не учитывать, потому что связанные с ними касательные напряжения в поперечных сечениях колонны незначительны по сравнению с касательными напряжениями, связанными с действиями крутящих моментов.

Эпюра продольных усилий $N(\xi)$ строится в соответствии с формулой (37).

Выводы

В связи с тем, что точные аналитические решения задачи о напряженно-деформированном состоянии буровой колонны при бурении на акватории с учетом силовых и дислокационных воздействий на нее связаны с существенными математическими проблемами и весьма неудобны в практическом применении вследствие своей громоздкости, авторами представлен достаточно простой вариант приближенного аналитического решения этой задачи при отсутствии поперечных силовых воздействий, а также известный классический способ решения методом сил при действии поперечных нагрузок. Вследствие простоты и достаточной точности результатов эти методы решения могут быть рекомендованы для широкого практического применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Котов А.А., Коротаев Б.А. Расчет бурильной колонны для бурения на акватории // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. 2017. Вып. 1. С. 112–119.
2. Сароян А.Е. Бурильные колонны в глубоком бурении. М.: Недра, 1980. 232 с.
3. Сароян А.Е. Проектирование бурильных колонн. М.: Недра, 1971. 181 с.
4. Сароян А.Е. Теория и практика работы бурильной колонны. М.: Недра, 1990. 262 с.

REFERENCES

1. Kotov A.A., Korotaev B.A. Raschet buril'noi kolonny dlya bureniya na akvatorii [Calculation of the Drill String for Drilling in the Water Area]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Arkticheskii region — Higher Education Newsletter. Arctic Region, 2017, Issue 1, pp. 112–119. [in Russian].
2. Saroyan A.E. Buril'nye kolonny v glubokom bureanii [Drill Strings in Deep Drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 232 p. [in Russian].
3. Saroyan A.E. Proektirovanie buril'nykh kolonn [Drill String Design]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 181 p. [in Russian].
4. Saroyan A.E. Teoriya i praktika raboty buril'noi kolonny [Theory and Practice of Drill String Operation]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 262 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Котов Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, профессор кафедры «Строительство, теплоэнергетика и транспорт», Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Российская Федерация

Alexey A. Kotov, Candidate of Engineering Sciences, Professor of Construction, Heat Power Engineering and Transport Department, Murmansk State Technical University, Murmansk, Russian Federation

e-mail: kotovaa@mstu.edu.ru

Коротаев Борис Александрович, доцент кафедры «Морское нефтегазовое дело», Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Российская Федерация

Boris A. Korotaev, Associate Professor of Marine Oil and Gas Business Department, Murmansk State Technical University, Murmansk, Russian Federation

e-mail: korotaevba@mstu.edu

Янгиров Фарит Наилович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Farit N. Yangirov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Well Drilling Department, USPTU

e-mail: bngs-ufa@mail.ru