ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ (Форум горняков)

Улитин Г.М., Царенко С.Н. Донецкий национальный технический университет, Украина

Исследовано влияние граничных условий и параметров подкрепления на устойчивость обсадных труб. Приведено обоснование выбора эффективной жесткости силовых шпангоутов. Даны рекомендации к выбору рационального способа возведения крепи.

Обсадные трубы в процессе эксплуатации (при засорении дренажных каналов) и при монтаже подвергается внешнему гидростатическому, а в некоторых случаях и горному давлению. В работе [1] рассмотрен вопрос определения параметров конструктивных элементов колонны из условия обеспечения их прочности. При этом, учитывая габариты трубы и характер действующих нагрузок, возникает необходимость конструктивно обеспечить не только прочность, но и сохранение устойчивости.

Величина критического давления, воспринимаемого трубой, определяет:

– выбор способа монтажа (секциями или на плаву);

– высоту разового заполнения цементным раствором;

– глубину участка при осушении ствола;

– количество и частоту дренажных отверстий.

Конструктивными особенностями, влияющими на величину давления, являются:

1.Геометрия трубы (длина, радиус и толщина);

2.Параметры бандажа (изгибная жесткость и шаг);

3.Условия закрепления на торцах.

Наиболее полный анализ устойчивости, с учетом всех вышеперечисленных особенностей, позволяет провести полубезмоментная теория оболочек, которая соответствует случаю внешнего давления. В качестве расчетной схемы (рис. 1) рассмотрим оболочку длинной l, радиусом R и толщиной δ, загруженную внешним давлением q. Уравнение полубезмоментной теории, соответствующее принятой схеме, имеет вид [2]

$$\frac{E\delta}{R}\frac{\partial^4 w}{\partial\alpha^4}+\frac{D}{R^3}\left(\frac{\partial^8 w}{\partial\varphi^8}+2\frac{\partial^6 w}{\partial\varphi^6}+\frac{\partial^4 w}{\partial\varphi^4}\right)+q\left(\frac{\partial^6 w}{\partial\varphi^6}+\frac{\partial^4 w}{\partial\varphi^4}\right)=0 \qquad (1)$$

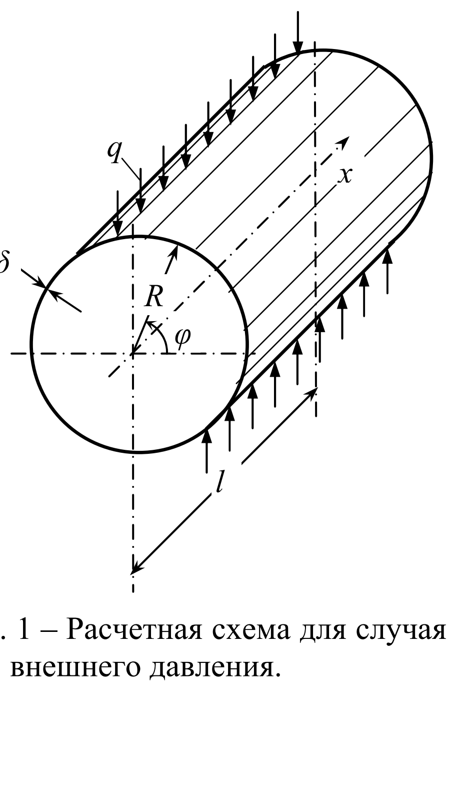

Рис. 1 – Расчетная схема для случая внешнего давления.

где $D=\dfrac{E\delta^3}{12}$ – изгибная жесткость оболочки, $\alpha=\dfrac{x}{R}$ – безразмерная координата.

Решение уравнения (1) ищем в виде

$$w=X(\alpha)\sin n\varphi. \qquad (2)$$

В результате подстановки (2) в (1) получим:

$$\frac{d^4X}{d\alpha^4}-\beta^4X=0; \qquad (3)$$

здесь $\beta^4=\dfrac{qR}{E\delta}n^4\left(n^2-1\right)-D\dfrac{n^4\left(n^2-1\right)^2}{E\delta R^2}$, отсюда находим выражение для критического давления q:

$$q=\beta_1^4\frac{E\delta}{R}\frac{1}{n^4\left(n^2-1\right)}+\left(n^2-1\right)\frac{D}{R^3}, \qquad (4)$$

где β_1 – наименьшее собственное значение уравнения (3) для заданного варианта краевых условий, n – число полуволн, соответствующее минимуму q. Решение уравнения (3) имеет вид

$$X(\alpha) = C_1 \sin \alpha\beta + C_2 \cos \alpha\beta + C_3 sh\alpha\beta + C_4 ch\alpha\beta \,. \qquad (5)$$

Уравнения перемещений и усилий можно определить по формулам [2]:

$$u = \frac{1}{n^2}\frac{dX}{d\alpha}\sin n\varphi\,,\; T_x = \frac{E\delta}{Rn^2}\frac{d^2X}{d\alpha^2}\sin n\varphi\,,\; S = -\frac{E\delta}{Rn^3}\frac{d^3X}{d\alpha^3}\cos n\varphi\,. \qquad (6)$$

Полученное решение не удобно использовать для оболочек имеющих несколько промежуточных участков (при наличии шпангоутов), поэтому с практической точки зрения более целесообразно воспользоваться методом начальных параметров [3]. Подставив решение (5) в выражение (2) с учетом зависимостей (6) и выразив постоянные C_{1-4} через начальные параметры: w_0, u_0, T_{x0}, S_0, получим выражения для:

– радиальных перемещений

$$w(\alpha,\varphi) = \left(w_0 A_{\alpha\beta} + u_0 \frac{n^2}{\beta} B_{\alpha\beta} + T_{x0}\frac{Rn^2}{E\delta\beta^2} C_{\alpha\beta} - S_0 \frac{Rn^3}{E\delta\beta^3} D_{\alpha\beta} \right) \sin n\varphi\,; \qquad (7)$$

– осевых перемещений

$$u(\alpha,\varphi) = \left(w_0 \frac{\beta}{n^2} D_{\alpha\beta} + u_0 A_{\alpha\beta} + T_{x0}\frac{R}{E\delta\beta} B_{\alpha\beta} - S_0 \frac{Rn}{E\delta\beta^2} C_{\alpha\beta} \right) \sin n\varphi\,; \qquad (8)$$

– осевых усилий

$$T_x(\alpha,\varphi) = \left(w_0 \frac{E\delta\beta^2}{Rn^2} C_{\alpha\beta} + u_0 \frac{E\delta\beta}{R} D_{\alpha\beta} + T_{x0} A_{\alpha\beta} - S_0 \frac{n}{\beta} B_{\alpha\beta} \right) \sin n\varphi\,; \qquad (9)$$

– касательных усилий

$$S(\alpha,\varphi) = \left(-w_0 \frac{E\delta\beta^3}{Rn^3} B_{\alpha\beta} - u_0 \frac{E\delta\beta^2}{Rn} C_{\alpha\beta} - T_{x0}\frac{\beta}{n} D_{\alpha\beta} + S_0 A_{\alpha\beta} \right) \cos n\varphi\,, \qquad (10)$$

где $A_{\alpha\beta}$, $B_{\alpha\beta}$, $C_{\alpha\beta}$, $D_{\alpha\beta}$ – динамические функции А.Н. Крылова [3].

Не сложно проследить аналогию уравнений (3.7)-(3.10) с соответствующими уравнениями при колебании балки с распределенными параметрами [3].

В работе [4] рассмотрен вопрос потери устойчивости оболочки усиленной шпангоутом и при этом возможны следующие варианты: если шпангоут упругий, то происходит общая потеря устойчивости рис. 2 а); если жесткий – местная рис. 2 б).

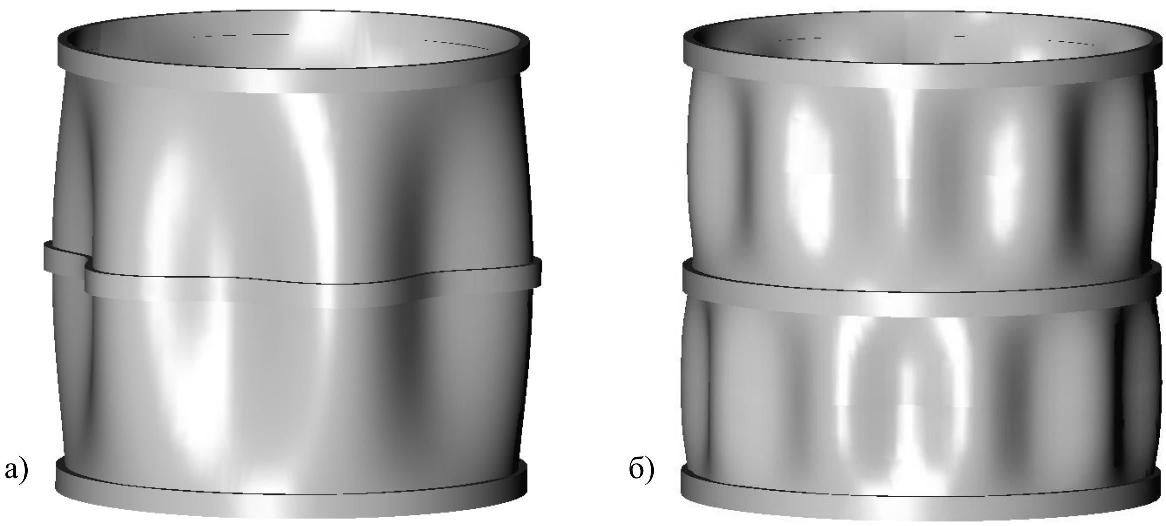

Рис. 2 – Потеря устойчивости секции трубы: а) – общая; б) – местная.

Определим условия, при которых возникает переход от одной формы к другой. Рассмотрим схему (рис. 3). На расстоянии a от края оболочки находится шпангоут с изгибной жесткостью EI_x, тогда для данной схемы уравнение (7) можно представить в виде

$$w(\alpha,\varphi)=\left(u_0\frac{n^2}{\beta}B_{\alpha\beta}-S_0\frac{Rn^3}{E\delta\beta^3}D_{\alpha\beta}-S_{\text{ш}}\frac{Rn^3}{E\delta\beta^3}D_{(\alpha-\gamma)\beta}\right)\sin n\varphi\,, \tag{11}$$

где $\gamma=\dfrac{a}{R}$ – безразмерное расстояние, а $S_{\text{ш}}$ – реакцию со стороны шпангоута можно определить из зависимости

$$\frac{EJ_x}{R^4}\left(\frac{d^5w_{\text{ш}}}{d\varphi^5}+2\frac{d^3w_{\text{ш}}}{d\varphi^3}+\frac{dw_{\text{ш}}}{d\varphi}\right)=S_{\text{ш}}$$

Приравняв, согласно условию совместности деформаций кольца и оболочки ($w_{\text{ш}}=w(\gamma,\varphi)$), получим

$$S_{\text{ш}}=\frac{EI_xn\left(n^2-1\right)^2}{R^4}\left(u_0\frac{n^2}{\beta}B_{\gamma\beta}-S_0\frac{Rn^3}{E\delta\beta^3}D_{\gamma\beta}\right)\cos n\varphi\,. \tag{12}$$

Подставив зависимость (12) в выражение (11) и собрав коэффициенты при u_0 и S_0 получаем

$$\begin{aligned}w(\alpha,\varphi)=\Bigg(&u_0\frac{n^2}{\beta}\left(B_{\alpha\beta}-\frac{I_xn^4\left(n^2-1\right)^2}{R^3\delta\beta^3}B_{\gamma\beta}D_{(\alpha-\gamma)\beta}\right)-\\&-S_0\frac{Rn^3}{E\delta\beta^3}\left(D_{\alpha\beta}-\frac{I_xn^4\left(n^2-1\right)^2}{R^3\delta\beta^3}D_{\gamma\beta}D_{(\alpha-\gamma)\beta}\right)\Bigg)\sin n\varphi.\end{aligned} \tag{13}$$

Неизвестные параметры u_0 и S_0 определим из условия закрепления на втором торце оболочки

$$\begin{cases}w\left(\dfrac{l}{R},n\right)=0\\T_x\left(\dfrac{l}{R},n\right)=0\end{cases}. \tag{14}$$

Из первого условия (14) выразим u_0 через S_0

$$u_0=S_0\frac{nl^2}{E\delta\lambda^2R}\frac{D_\lambda\lambda^3-\bar I_xD_{\lambda\xi}D_{\lambda(1-\xi)}}{B_\lambda\lambda^3-\bar I_xB_{\lambda\xi}D_{\lambda(1-\xi)}} \tag{15}$$

Здесь введены обозначения: $\lambda=\dfrac{l\beta}{R}$, $\xi=\dfrac{a}{l}$, $\bar I_x$ – безразмерный осевой момент сопротивления:

$$\bar I_x=\frac{I_xl^3n^4\left(n^2-1\right)^2}{R^6\delta}. \tag{16}$$

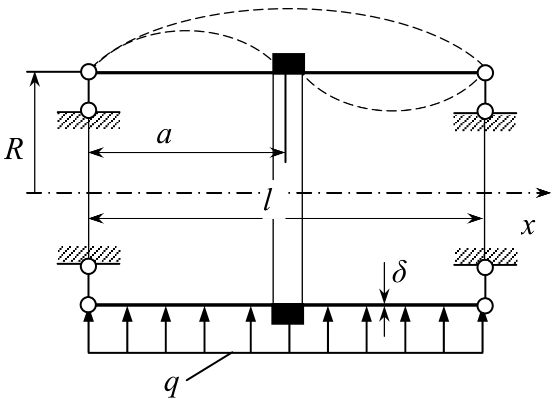

Рис. 3 Схема для определения эффективной жесткости шпангоута

Подставив зависимость (15) во второе условие (14) и с учетом, что $S_0\neq0$, получаем окончательное уравнение устойчивости относительно параметра λ

$$\frac{D_\lambda\lambda^3-\bar I_xD_{\lambda\xi}D_{\lambda(1-\xi)}}{B_\lambda\lambda^3-\bar I_xB_{\lambda\xi}D_{\lambda(1-\xi)}}\left(D_\lambda\lambda^3-\bar I_xB_{\lambda\xi}B_{\lambda(1-\xi)}\right)-\left(B_\lambda\lambda^3-\bar I_xD_{\lambda\xi}B_{\lambda(1-\xi)}\right)=0\,. \tag{17}$$

Анализ уравнения (17) показал, что изменение $\bar I_x$ от 0 до $\bar I_{эф}$ приводит к изменению λ_1 от $\lambda_{\min}=\pi$ до $\lambda_{\max}=2\pi$ и дальнейшее увеличение $\bar I_x$ не влияет на значения λ_1. Определим из уравнения (17) величину $\bar I_{эф}$

$$\bar I_{эф}=\lambda_1^3\frac{B_{\lambda_1}^2-D_{\lambda_1}^2}{B_{\lambda_1}\left(D_{\lambda_1\xi}B_{\lambda_1(1-\xi)}+B_{\lambda_1\xi}D_{\lambda_1(1-\xi)}\right)-D_{\lambda_1}\left(B_{\lambda_1\xi}B_{\lambda_1(1-\xi)}+D_{\lambda_1\xi}D_{\lambda_1(1-\xi)}\right)} \tag{18}$$

Подставляя $\lambda = \lambda_{\max} = 2\pi$ найдем $\bar{I}_{эф} \approx 996$. Число полуволн n определим минимизируя выражение (4) по n, при условии $\frac{1}{n^2} << 1$ получим

$$n = \sqrt[8]{\frac{36\lambda^4 R^6}{l^4\delta^2}}. \tag{19}$$

Так как n и λ являются взаимозависимыми, проанализируем характер поведения функции (4). Для того, что бы произошел переход от общей формы потери устойчивости к местной должно выполняться условие

$$q(\lambda_{\max}, n_{\max}) \le q(\bar{\lambda}, \bar{n}) \tag{20}$$

где $n_{\max,\min} = n(\lambda_{\max,\min})$, $\bar{\lambda}, \bar{n}$ – промежуточные значения. Если учесть, что возможно всего два варианта потери устойчивости – общая при $n = n_{\min}$ и местная при $n = n_{\max}$, то условие (20) можно записать в виде

$$q(\lambda_{\max}, n_{\max}) \le q(\bar{\lambda}, n_{\min}) \tag{21}$$

Подставив выражение (4) с учетом зависимости (19) в условие (21) получаем

$$\bar{\lambda} = \lambda_{\min} \sqrt[4]{4\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} - 3} \tag{22}$$

Таким образом, подставив выражения (22) и (19) в зависимость (16) и упростив, окончательно получим

$$I_{эф} = \frac{\bar{I}_{эф}\delta^3 l}{36\bar{\lambda}^4} K_n \text{ или } EI_{эф} = \frac{\bar{I}_{эф}}{3\bar{\lambda}^4} K_n D l. \tag{23}$$

В выражение (23) введен коэффициент $K_n = \frac{n_{\min}^4}{\left(n_{\min}^2 - 1\right)^2}$, учитывающий погрешность, связанную с условием $\frac{1}{n^2} << 1$.

Если полученные результаты сравнить с представленными в [4], то различия в значениях эффективной жесткости, в зависимости от n, составят 2% – 15%.

Для длинных оболочек наличие силового шпангоута может и не приводить к изменению формы по числу n. Длину такой оболочки приблизительно можно определить из зависимости (19), подставив $n = 2$ и $\lambda = \bar{\lambda}$

$$l = \frac{\bar{\lambda} R}{4}\sqrt{\frac{6R}{\delta}} \tag{24}$$

В силу того, что дальнейшее увеличение длины не оказывает влияние на n, то величину эффективной жесткости можно определить из выражения (16) положив $n = 2$

$$EI_{эф} = \frac{\bar{I}_{эф} R^6 \delta E}{144 l^3} \tag{25}$$

Рассмотрим теперь случай, когда на участке располагается несколько упругих шпангоутов. Вывод уравнения типа (13) при большом числе ребер представляет определенную сложность. Рассмотрим две схемы (рис. 4.) в первом случае шпангоут находится на произвольном расстоянии, во втором – по середине пролета. Выпишем уравнения устойчивости для обеих схем – для первой оно будет иметь вид (17), а для второй

$$\frac{D_\lambda \lambda^3 - \chi \bar{I}_x D_{0,5\lambda}^2}{B_\lambda \lambda^3 - \chi \bar{I}_x B_{0,5\lambda} D_{0,5\lambda}}\left(D_\lambda \lambda^3 - \chi \bar{I}_x B_{0,5\lambda}^2\right) - \left(B_\lambda \lambda^3 - \chi \bar{I}_x D_{0,5\lambda} B_{0,5\lambda}\right) = 0 \tag{26}$$

Положим, схема б) и а) имеют одинаковые значения $q_{кр}$, тогда определив из (17) λ, для произвольно расположенного ребра и подставив в выражение (26) можно определить коэффициент приведения

$$\chi = \frac{\lambda^3}{\bar{I}_x} \frac{B_\lambda^2 - D_\lambda^2}{2B_\lambda D_{0,5\lambda} B_{0,5\lambda} - D_\lambda \left(B_{0,5\lambda}^2 + D_{0,5\lambda}^2\right)}. \qquad (27)$$

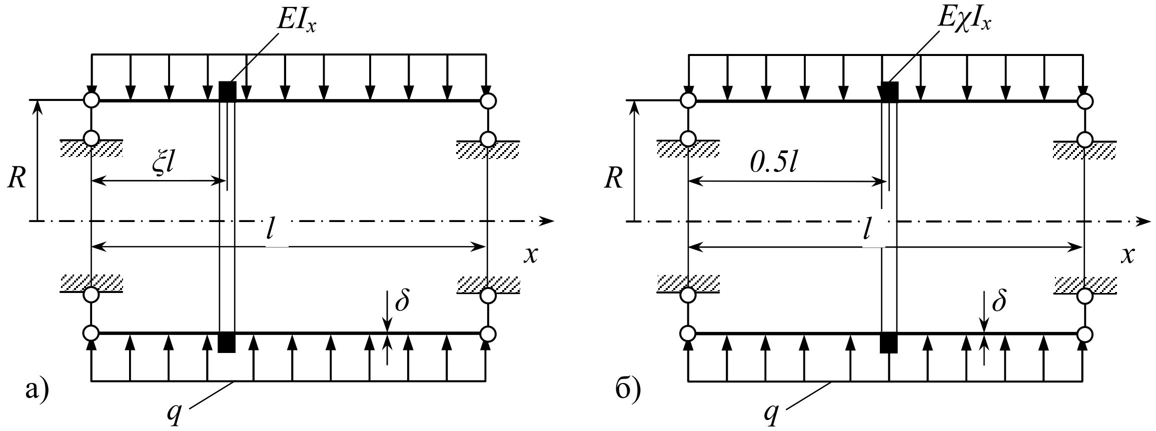

Рис. 4. Схема для определения приведенной жесткости шпангоута

Таким образом, если есть участок с некоторым числом $k_ш$ промежуточных шпангоутов и при этом жесткость не у одного из них не достигает эффективной величины, то, определив коэффициент приведения χ_i для каждого ребра отдельно, можно найти приведенный осевой момент сопротивления

$$\bar{I}_{пр} = \sum_{i=1}^{k_ш} \bar{I}_{xi} \chi_i \qquad (28)$$

Подставив $\bar{I}_{пр}$ вместо $\chi \bar{I}$ и решив уравнение (26), можно определить значение критической нагрузки для такого участка.

Если на заданном участке число ребер значительно, и они имеют одинаковую жесткость и расположены с постоянным шагом, то такую конструкцию можно рассматривать как ортотропную и при этом жесткость ребер «размазывается». Тогда выражение (4) принимает вид

$$q = \frac{\lambda^4 R^3 E\delta}{l^4} \frac{1}{n^4\left(n^2-1\right)} + \left(n^2-1\right)\frac{D_{пр}}{R^3}, \qquad (29)$$

где λ – соответствует собственному значению уравнения устойчивости для гладкой оболочки согласно заданной схеме, $D_{пр} = D + \frac{EI_x}{s}$ – приведенная жесткость оболочки, s – шаг шпангоутов.

При одновременном действии внешнего давления и осевого сжатия на оболочку значение критической нагрузки можно определить из уравнения [2]

$$\frac{p}{p_{0,в}} + \frac{q}{q_{0,в}} = 1, \qquad (30)$$

где p, q – соответственно осевая нагрузка и внешнее давление, $p_{0,в}, q_{0,в}$ – соответственно критические значения нагрузки осевого сжатия и внешнего давления, приложенные отдельно друг от друга.

Критическая нагрузка осевого сжатия определяется по формуле [2]

$$p_в = \frac{1}{\sqrt{3\left(1-\mu^2\right)}} E\frac{\delta}{R}. \qquad (31)$$

В качестве примера, рассмотрим спуск обсадной колонны диаметром $d = 4{,}3$ м на плаву в скважину глубиной $l = 600$ м при помощи буровой установки грузоподъемностью $G_у = 3200$ кН.

Методика проведения монтажных работ описана в работе [5]. Данные кавернограммы ствола показали, что верхний участок длиной 250 м можно обсаживать одной секцией. Удельный вес промывочной жидкости в скважине составляет $\gamma_{ж} = \rho g = 11760$ Н/м^3. Колонна представляет собой трубу с толщиной стенки $\delta = 0{,}016$ м, и диаметром $d = 4{,}3$ м, погонный вес колонны $\gamma_T = m_T g$, где m_T – погонная масса трубы, $m_T = 1695$ кг. Определим необходимое снижение веса на крюк установки:

$$\Delta G = \gamma_T L - G_y = 1695 \cdot 9{,}8 \cdot 250 - 3200 \cdot 10^3 = 953 \text{ кН}.$$

Требуемая высота опорожнения колонны согласно [5] будет

$$H = \frac{\Delta G}{0{,}785 d^2 \gamma_{ж}} = \frac{953 \cdot 10^3}{0{,}785 \cdot 4{,}3^2 \cdot 11760} = 5{,}6 \text{ м}.$$

Спуск трубы осуществляется следующим образом: колонна наращивается на длину $l_н$, как и при секционном способе пока нагрузка на буровую вышку не составит $3/4G_y$, $l_н = 3/4G_y/\gamma_T \approx 145$ м, после чего устанавливается стальное днище. Далее спуск проводится с постоянным контролем уровня жидкости над днищем с условием, что нагрузка на буровую установку не превысит G_y.

Таким образом, участок трубы длиной $l = L - l_н - H \approx 100$ м будет нагружен постоянным внешним давлением $q = \gamma_{ж} H = 11760 \cdot 5{,}6 = 0{,}067$ МПа, и сжимающей нагрузкой $p = \Delta G / \pi d \delta = 953 \cdot 10^3 / \pi \cdot 4{,}3 \cdot 0{,}016 = 4{,}4$ МПа, тогда расчетная нагрузка на крепь по (30) с учетом (31) составит $q_p \approx 0{,}0673$ МПа. Определим критическую величину давления, которое может воспринимать загруженный участок крепи по следующей методике:

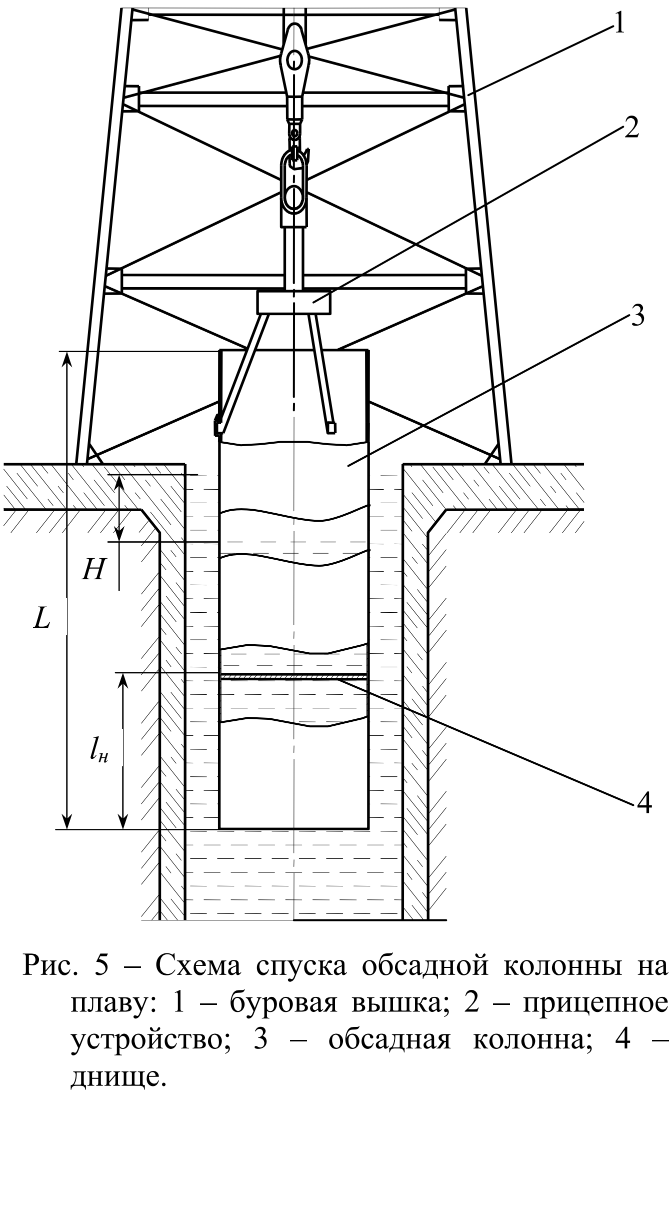

Рис. 5 – Схема спуска обсадной колонны на плаву: 1 – буровая вышка; 2 – прицепное устройство; 3 – обсадная колонна; 4 – днище.

1. Выберем схему, отвечающую граничным условиям – если днище считать жестким, а закрепления вверху шарнирным, то схема будет иметь вид (рис. 6).
2. Для выбранной схемы, определим первый корень уравнения устойчивости $\lambda_1 = 3{,}93$ (см. соответствующую схему колебания балки с распределенными параметрами [3]).
3. По зависимости (18) определим число полуволн: $n = 1{,}55$, т.е. принимаем $n = 2$
4. Подставим полученные значения и геометрические характеристики колонны в выражение (4): $q_{кр} = 0{,}022$ МПа.

Очевидно, что жесткость такой конструкции не достаточна для выбранного способа спуска. Возможно несколько вариантов повышения жесткости.

Первый вариант заключается в усилении конструкции упругими шпангоутами, равномерно расположенными по всей длине участка. В этом случае, предвари-

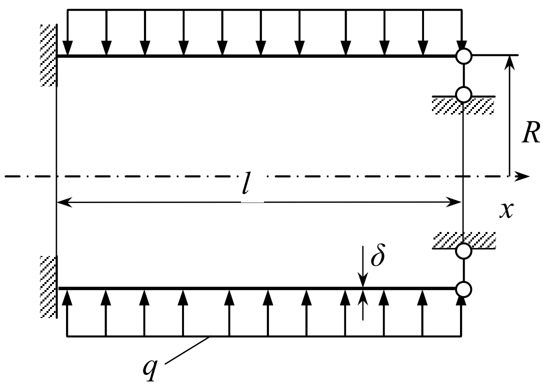

Рис. 4.6 Расчетная схема спуска обсадной колонны на плаву

тельно задавшись одним из параметров ребра (шагом или моментом сопротивления) по зависимости (29) можно определить второй. Например, из условия технологичности изготовления труб в качестве ребер жесткости принимаем швеллер №16 ($I_x = 63{,}6$ см^4), тогда шаг составит $s = 0{,}86$ м. Такой вариант приводит к увеличению массы колонны на 13%.

Второй вариант заключается в установке на время монтажа жестких съемных бандажей. Необходимое расстояние между бандажами можно определить из выражения (4) приняв $n = 3$, так же надо учесть, что $\lambda_1 = 3{,}93$ соответствует только первому участку трубы со стороны днища, для остальных будет $\lambda_1 = \pi$. Длина промежуточного участка составит $l = 25$ м, т.е. на всю секцию понадобится 3 бандажа. Недостаток такого варианта состоит в снижении эксплутационной надежности крепи в случае воздействия на нее горного давления, т.к. уменьшение изгибной жесткости трубы приводит к возникновению вмятин и других дефектов.

Таким образом, наиболее рациональный способ возведения крепи можно обеспечить из следующих соображений – параметры шпангоутов необходимо выбирать из условий возможного взаимодействия обсадных труб с горным массивом, а прочность и жесткость в процессе монтажа обеспечивать дополнительными приспособлениями.

Список литературы

1. Улитин Г.М. Царенко С.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния обсадной колонны при спуске на плаву. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Гірничо-геологічна”. Випуск 105. – Донецьк, ДонНТУ, 2006. – С. 114-117.
2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
3. Сопротивление материалов. Специальный курс. Метод начальных параметров: Уч. пособие/ Ф.Л. Шевченко. С.А. Жеданов. – К.: УМК ВО, 1992. – 184 с.
4. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с.
5. Добровольский Г.Б., Казикаев Д.М., Петриченко В.П. Крепление скважин большого диаметра. – М.: Недра, 1988. – 238 с.