

УДК 622.251

С. Н. Царенко, д-р. физ.-мат. наук, доц., **Ю. В. Петтик**, канд. техн. наук, доц.
Камчатский государственный технический университет, Россия
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 312-37-95; E-mail: tzarenko@gmail.com, mr.pettik@yandex.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ ОБСАДНОЙ ТРУБЫ, КАК ОБОЛОЧКИ РАБОТАЮЩЕЙ НА ВНЕШНЕЕ ДАВЛЕНИЕ

В статье приведено обоснование параметров стальной крепи, работающей при спуске на плаву на основании исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости обсадной трубы, как оболочки работающей на внешнее давление.

Ключевые слова: оболочка, внешнее давление, изгибная жесткость, напряженно-деформированное состояние, численные методы, запас прочности, критическая нагрузка, материалоемкость

S. N. Tsarenko, Yu. V. Pettik

STABILITY OF THE CASING PIPE AS A SHELL WORKING ON EXTERNAL PRESSURE

Justification of parameters of the steel mountain support working during descent afloat on the basis of a research of the intense deformed state and stability of the casing pipe as support working for external pressure is given in article.

Keywords: casing shell, stability and stiffness of the casing pipe, external pressure, bending stiffness, stress-strain state, numerical methods, safety margin, critical load, material capacity

При строительстве шахт в качестве постоянной крепи стволов и скважин большего диаметра используется стальная крепь, в виде стальных обсадных труб с последующим тампонированием или цементацией.

В процессе возведения крепи в выработке, заполненной буровой жидкостью, горное давление на нее не действует, но в процессе спуска на плаву, тампонирования и особенно после откачки жидкости, оно значительно возрастает. Поэтому крепь должна быть прочной, а в стволах и скважинах, используемых для проветривания, спуска и подъема людей и материалов, еще и прямолинейной, неогнеопасной, водонепроницаемой.

Стальная крепь представляет собой кольцо, полученное после вальцовки на листогибочной машине листа толщиной 10 – 20 мм с последующим свариванием стыка. Для увеличения прочности на смятие, кольца оснащаются бандажами из листовой стали в виде полосы шириной 300 мм, толщиной 20 мм или из швеллеров № 12 – 18, которые располагаются снаружи на трубе через 750, 1000, 1500 мм (рис. 1).

Кольца диаметром до 2,8 м свариваются в трубу длиной 6 м и транспортируются на буровой участок. Кольца диаметром от 3,0 до 3,5 м перевозятся в вертикальном положении и стыкуются в колонну непосредственно на буровой. Крепь диаметром от 4,2 м до 6,0 м и более формируется из сегментов, поступающих с завода, путем сваривания

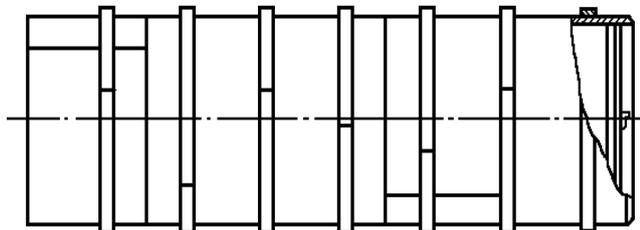


Рисунок 1. Конструкции обсадных труб с бандажами из швеллеров

их в специальном кондукторе станда для изготовления крепи на буровом участке.

Спуск обсадной колонны на плаву очень сложная практическая задача, так как ее успешная реализация зависит от ряда факторов, среди которых основными являются: точность составления расчетных моделей на стадии проектирования, а также качество изготовления и сборки обсадных труб. Существующие методы проектирования колонны [1-3] базируются на ее расчете, как многослойной оболочки, находящейся под действием внешнего давления. Такой подход не отражает в полной мере работу обсадных труб под действием нагрузок, которые в частности возникают при проведении монтажных работ.

Также следует отметить, что принятые расчетные схемы основаны на идеализированной конструкции оболочки. На практике трубы имеют несовершенство формы и неоднородную цилиндрическую жесткость, за счет наличия монтажных окон (рис. 2.), а также радиальных и осевых смещений между шпангоутами в сегментах труб при сборке и монтаже, (рис. 3). При этом длина секции составляет 30 – 32 м.

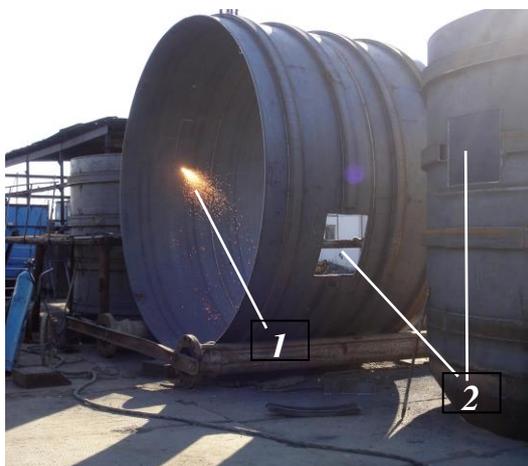


Рисунок 2. Прорезание монтажных окон в секции обсадной трубы:

1 – вырезка монтажного окна;

2 – вырезанные окна



Рисунок 3. Монтаж колонны труб на устье скважины

Не имея теоретических обоснований для учета влияния указанных выше дефектов формы и структуры, на стадии проектирования колонны закладывают завышенные коэффициенты запаса, что в свою очередь приводит не только к увеличению материалоемкости конструкции и соответственно ее стоимости, но и к увеличению монтажных нагрузок.

Для расчета длинных оболочек на устойчивость распространена модель кругового кольца [4-6]. В работе [4] рассмотрена задача устойчивости круговой арки, шарнирно-опертой по краям под действием равномерно-распределенного давления. В работе [5] исследован вопрос устойчивости круговых колец при воздействии различного вида симметричных нагрузок. Некоторые случаи устойчивости составных колец рассмотрены в работе [6]. Таким образом, в справочной литературе нет готовой модели, которую можно непосредственно использовать для решения выше поставленной задачи.

Целью данной работы является обоснование конструктивных параметров стальной крепи на основании исследования напряженно-деформированного состояния, жесткости и устойчивости обсадной трубы, как оболочки работающей на внешнее давление.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) разработать новую модель обсадной трубы с учетом местных концентраторов напряжений, 2) исследование напряженно-деформированное состояние, жесткость и устойчивость.

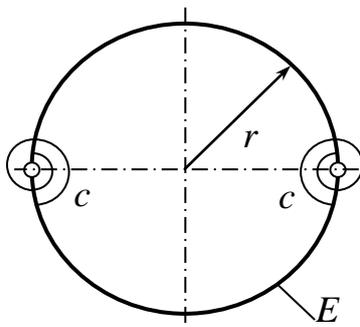


Рисунок 4. Схема

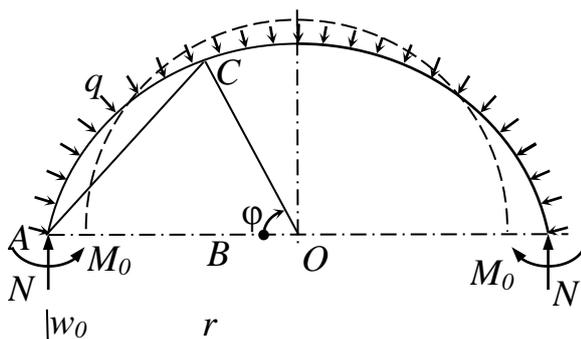


Рисунок 5. Схема распределения

с учетом, что

$AC^2 = OC^2 - OA^2 + 2OA \cdot AB$, выражение (2) примет вид

$$M = -M_0 - 0,5q(OC^2 - OA^2). \tag{3}$$

Для исследования влияния ослабления цилиндрической жесткости в определенных сечениях трубы на величину критической нагрузки, рассмотрим кольцо радиусом r , с изгибной жесткостью EJ , которое в ослабленных сечениях имеет шарниры с упругой связью с жесткостью c (рис. 4).

Для решения задачи устойчивости кольца, под действием равномерно распределенного давления, представим конструкцию в деформированном состоянии (рис. 5). Продольное усилие, действующие со стороны отброшенной части, найдем из условия равновесия $N = q \cdot OA$ части кольца. Изгибающий момент M_0 определяется через жесткость упругой связи (1)

$$M_0 = -\frac{c}{r} \frac{dw}{d\varphi} \Big|_{\varphi=0}. \tag{1}$$

Момент в произвольном сечении будет

$$M = -M_0 + q \cdot OA \cdot AB - 0,5q \cdot AC^2, \tag{2}$$

Подставив в уравнение (3) $OA = r + w_0$ и $OC = r + w$, и отбросив малые величины второго порядка, получим

$$M = -M_0 - qr(w^2 - w_0^2). \quad (4)$$

Для представленной расчетной схемы (рис. 5) дифференциальное уравнение радиальных перемещений имеет вид (5) [7]

$$\frac{d^2w}{d\varphi^2} + w = \frac{r^2}{EJ} (-M_0 - qr(w - w_0)). \quad (5)$$

Представим уравнение (5) в виде

$$\frac{d^2w}{d\varphi^2} + w \left(1 + \frac{qr^3}{EJ} \right) = -\frac{M_0 r^2}{EJ} + \frac{qr^3 w_0}{EJ} \quad (6)$$

и введем обозначение $k^2 = 1 + \frac{qr^3}{EJ}$, тогда общее решение дифференциального уравнения (6) будет

$$w = A \sin k\varphi + B \cos k\varphi - \frac{M_0 r^2}{k^2 EJ} + \frac{w_0}{k^2} (k^2 - 1). \quad (7)$$

Определим постоянные интегрирования A и B (7) и выражение для момента M_0 . Из условия отсутствия перемещения в окружном направлении и угла поворота в сечении $\varphi = \pi/2$ получим

$$\left. \frac{dw}{d\varphi} \right|_{\varphi=\pi/2} = Ak \cos \frac{k\pi}{2} - Bk \sin \frac{k\pi}{2} = 0, \text{ откуда } A = B \tan \frac{k\pi}{2},$$

с учетом полученного выражения и зависимости (1) найдем M_0

$$M_0 = -\frac{c}{r} Bk \tan \frac{k\pi}{2}.$$

Выражение для постоянной B получим исходя из зависимости

$$w(0) = w_0, \quad B \left(1 + \frac{cr}{kJ} \tan \frac{k\pi}{2} \right) + \frac{w_0}{k^2} (k^2 - 1) = w_0, \text{ откуда } B = \frac{w_0}{k^2 + \chi k \tan \frac{k\pi}{2}}, \text{ где } \chi = \frac{cr}{EJ} -$$

относительная жесткость упругой связи. Подставив найденные выражения в уравнение (7) получим

$$w = \frac{w_0}{k^2 + \chi k \tan \frac{k\pi}{2}} \left(\tan \frac{k\pi}{2} (\sin k\varphi + \chi k) + \cos k\varphi + k^2 - 1 \right). \quad (8)$$

При потере устойчивости длина дуги кольца должна остаться неизменной, тогда с учетом симметрии должно выполняться условие [4]

$$\int_0^{\pi/2} r w d\varphi = 0, \text{ откуда } \frac{w_0 r}{k^2 + \chi k \tan \frac{k\pi}{2}} \left(\frac{\pi \chi k^2 + 2}{2k} \tan \frac{k\pi}{2} + \frac{\pi}{2} (k^2 - 1) \right) = 0. \quad (9)$$

Упростив выражение (9), получаем уравнение для определения критической нагрузки

$$\tan \frac{k\pi}{2} = \frac{\pi k (1 - k^2)}{\pi \chi k^2 + 2}. \quad (10)$$

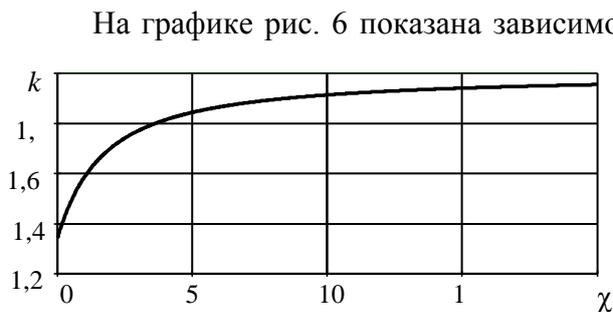


Рисунок 6. Зависимость коэффициента k от параметра χ

На графике рис. 6 показана зависимость коэффициента k от параметра χ , построенная по численным исследованиям уравнения (10). Из графика видим – с увеличением параметра χ значение k стремится к 2, что соответствует значению коэффициента k для сплошного кольца [4, 5, 7].

Рассмотрим конкретные случаи, связанные с ослаблением изгибной жесткости обсадной трубы.

Как уже отмечалось, в процессе сборки колоны в трубе вырезают окна (рис. 2), которые впоследствии заглушают при помощи накладок, при этом шпангоут, который проходил через окно при восстановлении подрезают (рис. 7), что приводит к ослаблению сечения под монтажной балкой по длине всей колоны.

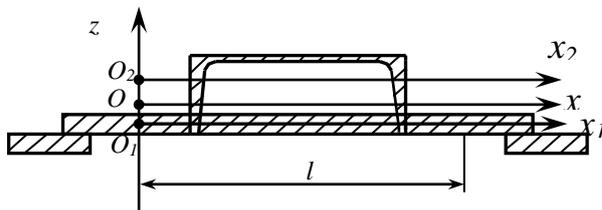


Рисунок 7. Расчетная схема.

В качестве примера, возьмем параметры конструкции: диаметр труб – 4,3 м, толщина стенки – 1,6 см, шпангоут – швеллер №16, шаг шпангоутов – 0,5 м, длина секции – 6 м (шаг расположения монтажных окон), размеры монтажного окна $b \times h = 0,8 \times 0,6 \text{ м}^2$. Условный момент

инерции поперечного сечения подрезанного шпангоута найдем по методу, описанному в работе [8] с учетом проявления краевого эффекта на участке трубы длиной l (рис. 7) – $J'_{\text{усл}} = 271 \text{ см}^4$, момент инерции не подрезанного шпангоута [8] – $J_{\text{усл}} = 488 \text{ см}^4$, тогда момент инерции сечения трубы – $J = 12J_{\text{усл}} = 5856 \text{ см}^4$, здесь 12 – число шпангоутов на секции, момент инерции ослабленного сечения – $J_1 = 11J_{\text{усл}} + J'_{\text{усл}} = 5639 \text{ см}^4$.

Коэффициент жесткости c можно определить, как момент, вызывающий взаимный угол поворота $\alpha = 1$ рад, на свободном конце, между пластинами с жесткостью EJ и EJ_1 (рис. 8)

$$c = \frac{2EJ \cdot EJ_1}{b(EJ - EJ_1)}, \text{ соответственно } \chi = \frac{cr}{EJ} = \frac{2rJ_1}{b(J - J_1)}. \quad (11)$$

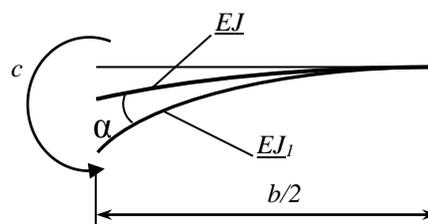
Для рассматриваемого примера $\chi = 140$, численно из формулы (10) находим $k = 1,993$, с учетом, что для сплошного кольца критическая нагрузка определяется зависимостью [4, 7]

$$q_{кр} = (n^2 - 1) \frac{EJ}{r^3}, \text{ где } n = 2,$$

при этом определим коэффициент снижения критической нагрузки

$$\Delta_q = \frac{k^2 - 1}{3} = 0,991.$$

Таким образом, из рассматриваемого случая, подрезание шпангоутов на монтажных окнах приводит к повышению критического давления на крепь не более чем на 1%. Это нужно учитывать при анализе общего напряженно-деформированного состояния и устойчивости обсадной металлической трубы. Данные расчеты позволят проанализировать возможность снижения общей материалоемкости крепи, уменьшить ее толщину, шаг расстановки шпангоутов, трудоемкость при ее изготовлении, включая прорезку окон, установку заглушек и прочее, и как итог – себестоимости изготовления.



ЛИТЕРАТУРА:

1. Общесоюзные нормы технологического проектирования шахтных стволов и скважин, сооружаемых способом реактивно-турбинного бурения (РТБ): ОНТП 3-80. – М.: Минуглепром СССР, 1980. – 74 с.
2. Жиленко, Н. П. Справочное пособие по реактивно-турбинному бурению. / Н. П. Жиленко, А. А. Краснощек – М.: Недра, 1987. – 309 с.
3. Добровольский Г. Б. Крепление скважин большого диаметра / Г. Б. Добровольский, Д. М. Казикаев, В. П. Петриченко – М.: Недра, 1988. – 238 с.
4. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / Вольмир А. С. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
5. Алфутов, Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Алфутов Н. А. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с.
6. Прочность устойчивость колебания: справочник: в 3 т. / [ред. Биргер И. А., Пановко Я. Г.]. – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 2. – 831 с.
7. Тимошенко, С. П. Устойчивость упругих систем / С. П. Тимошенко, – М.: ОГИЗ Гос. Изд-во технико-теорет. Лит., – 1946. – 533 с.
8. Царенко, С. Н. Обоснование параметров стальной крепи при бурении шахтных вертикальных стволов: дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Царенко. – Днепропетровск, 2008. – 158 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2020 г.