DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-27-38

*Дахно А.В. *, директор,
Смирнов Ю.П., кандидат технических наук,
заместитель директора по науке и новой технике,
Машков А.В., кандидат технических наук, профессор,
Рыженко Е.В., начальник отдела интеллектуальной собственности,
Волжский научно-технический комплекс (филиал)
Волгоградского государственного технического университета, Россия*
*Ответственный автор E-mail: ois@vntk-org.ru

ДЕФОРМАЦИЯ ПАКЕРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ПЕРЕПАДЕ ДАВЛЕНИЙ В СКВАЖИНЕ

Аннотация: предложен метод расчета напряженно-деформированного состояния оболочек пакерующего элемента, армированных системой металлических лент. Весь процесс деформации оболочки под действием внутреннего избыточного давления условно разбит на четыре этапа. Для каждого этапа рассмотрена схема деформации оболочки и дано решение задачи на основе положений нелинейной теории упругости и теории мягких оболочек. Все рассмотренные в данной работе этапы деформирования оболочки иллюстрируются расчетной схемой. Приведен пример расчета оболочки с заданными характеристиками и условиями деформирования.

Ключевые слова: пакерующий элемент, армирующая металлическая лента, напряженно-деформированное состояние, оболочка, внутренне избыточное давление, стенка скважины

Введение

Проектирование и оценка работоспособности пакерующего элемента (далее – ПЭ) при эксплуатации: перевода в рабочее состояние контакта со стенкой скважины при подаче в полость оболочки внутреннего рабочего избыточного давления и работе ПЭ в условиях перепада давлений в скважине с затеканием в межтрубный зазор, требует расчета силовых и деформационных характеристик оболочки.

Проработка конструкции ПЭ, выбор типа армирования и материалов целесообразно проводить с использованием адекватных интеллектуальных математических моделей, позволяющих выполнить полный спектр численных экспериментов по расчету силовых и деформационных характеристик оболочки. При построении математической модели процесса деформации ПЭ в области конечных деформаций оболочки под действием внутреннего избыточного давления до контакта со стенкой скважины, использовались методы нелинейной теории упругости эластомеров [1-4]. Для описания напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) оболочки в межтрубном зазоре под действием внутреннего рабочего избыточного давления и одностороннего сброса давления в межтрубном пространстве использовалась теория мягких оболочек [5-7].

Методы и материалы

В настоящей работе рассматривались оболочки ПЭ, армированные тонкими и узкими стальными лентами, уложенными по внутренней поверхности протекторного слоя оболочки параллельно образующим внутренней цилиндрической поверхности резиновой камеры с заданным начальным взаимным перекрытием t_0 .

Под действием внутреннего избыточного давления Δq_0 оболочка увеличивается («раздувается») в радиальном направлении и внешней поверхностью входит в контакт со стенкой скважины. При этом армирующие ленты смещаются одна относительно другой с уменьшением величины перекрытия вне области закрепления в штуцерах. Деформациями удлинения лент при растяжении пренебрегается, и ленты считаются нерастяжимыми. Малая толщина лент и их конструктивное расположение в оболочке позволяют рассматривать оболочку как мягкую [5-7] с использованием основных положений теории мягких оболочек. В частности в соответствии с вариационными принципами [11] все свободные от контакта с внешними границами поверхности мягких нерастяжимых оболочек [5-8] имеют сечения в форме окружности.

В дальнейших расчетах весь процесс деформации оболочки под действием внутреннего избыточного давления условно разбит на четыре этапа. Для каждого этапа рассмотрена схема деформации оболочки и дано решение задачи в рамках теории мягких оболочек [5-7]. Основными из используемых в настоящих расчетах положений теории мягких оболочек является свойства:

- профили меридиана оболочки вне контакта с ограничивающими стенками под действием внутреннего давления представляет собой дуги окружностей;

- натяжение в оболочке в меридиональном направлении T_m (кГс) равно:

$$T_m = P \cdot r, \quad (1)$$

где: P – распределенная по длине и нормальная к линии меридиана нагрузка, $\frac{\text{кГс}}{\text{см}}$; r – радиус кривизны

профиля меридиана, см.

Все рассмотренные в данной работе этапы деформирования оболочки иллюстрированы на Рис. 1, на котором кривые представляют собой меридианы сечения поверхности оболочки и рассматриваются как отдельные ленты армирующего каркаса.

Рис. 1. Расчетная схема деформирования оболочки пакерующего элемента: 1 – штوك; 2 – оболочка пакерующего элемента в транспортном положении; 3 – стенка скважины. Сечения меридиана 1 (пунктирная линия), 2 (штрихпунктирная линия), 3 (два штриха пунктирная линия), с участками контакта A_1A_5 , A_2A_6 , A_3A_7 , соответствуют первому, второму и третьему этапам. Сечение меридиана 4 (сплошная жирная линия) соответствует четвертому этапу с участками контакта A_4A_8 и M_2B_3

Fig. 1. The design diagram of the shell deformation of the packing element: 1 - stock; 2 - shell packing element in the transport position; 3 - wall of the well. The sections of the meridian 1 (dashed line), 2 (dash-dotted line), 3 (two dashes dashed line), with contact areas A_1A_5 , A_2A_6 , A_3A_7 , correspond to the first, second and third stages. Meridian section 4 (solid bold line) corresponds to the fourth stage with contact areas A_4A_8 and M_2B_3

Результаты и обсуждения

На первом этапе первоначально цилиндрическая поверхность оболочки ПЭ с внешним радиусом r_1 и меридиональным сечением M_1M_2 (рис. 1) под действием внутреннего избыточного давления Δq_0 переходит в цилиндрическую поверхность радиуса R_1 , входящую в контакт со стенкой скважины D_1D_2 с радиусом R_c , сечением меридиана $M_1A_1A_5M_3$ и образованием двух торообразных участков M_1A_1 и A_5M_3 в области концевых штуцеров M_1N_1 и M_3N_3 , соответственно. При контакте $R_1 = R_c$. Значения внутреннего избыточного давления Δq_0 , как функции начальных геометрических параметров оболочки, модуля упругости резины и коэффициента пакерования $k = \frac{R_c}{r_1}$ [9], определялись численно из решения нелинейной задачи радиального деформирования цилиндрического участка оболочки, рассмотренной в работах [2-4] с использованием потенциала Трелоара [1].

В силу нерастяжимости армирующих лент повышение внутреннего давления в мягкой оболочке до суммарной величины $(\Delta q_0 + \delta q_1)$, где δq_1 – избыточное внутреннее рабочее давление, не меняет геометрической конфигурации оболочки $M_1A_1A_5M_3$, и приводит только к увеличению усилий натяжения T в армирующих лентах и увеличению удельного контактного давления на стенку скважины. Причем для первого этапа сброс внешнего давления $\delta q_{2(1)}$ в межтрубном пространстве на правой границе ПЭ не происходит, то

есть $\delta q_{2(1)} = 0$ (нижний индекс в скобках здесь и далее соответствует номеру этапа деформирования). При этом предполагается, что на первом этапе левый штуцер M_1N_1 остается неподвижным, а правый штуцер M_2N_2 смещается без трения в осевом направлении на величину $h = |M_2M_3|$ (рис. 1). НДС оболочки далее определяется как симметричное, так как конфигурация сечения меридиана $M_1A_1A_5M_3$, в силу равенства перепадов давления внутри и вне оболочки на левом и правом торообразных участках, обладает геометрической симметрией относительно плоскости нормальной к оси оболочки и проходящей через середину отрезка M_1M_3 . Радиусы дуг сечения меридиана M_1A_1 и A_5M_3 равны между собой: $r^* = R_1 - r_1 = r_1 \cdot (k - 1)$.

Здесь геометрическими характеристиками профиля меридиана $M_1A_1A_5M_3$: являются радиус $r^* = R_1 - r_1 = r_1 \cdot (k - 1)$ торообразных участков M_1A_1 и A_5M_3 ; величина смещения правого штуцера $h = |M_2M_3| = (\pi - 2) \cdot r^*$; длина участка контакта оболочки со стенкой скважины:

$$2L_{k0} = |A_1A_5| = 2L_0 - \pi \cdot r^*, \quad (2)$$

где $2L_0 = |M_1M_2|$ – начальная длина меридиана оболочки. Усилия T_1 в армирующих лентах определяются по формуле:

$$T_1 = (\Delta q_0 + \delta q_1) \cdot \mu(k), \quad (3)$$

где:

$$\mu(k) = \frac{\pi \cdot r_1^2 (k^2 - 1)}{n}, \quad (4)$$

Δq_0 – избыточное давление в оболочке, при котором происходит контакт внешней поверхности оболочки со стенкой скважины D_1D_2 ; n – число армирующих лент каркаса. Из условия симметричности деформации на первом этапе следует, что усилия T_1 направлены ортогонально оси симметрии оболочки.

Разработана методика расчета величин R_1 , r^* , $2L_{k0}$, Δq_0 и T_1 , значения которых определяются величинами радиусов внутренней r_1 и внешней r_2 поверхностей оболочки до деформации, числом n и величиной перекрытия t_0 армирующих лент, величиной коэффициента пакерования k и величиной упругой характеристики C_1 , входящей в потенциал Трелоара [1].

На втором этапе происходит односторонний сброс внешнего давления в межтрубном пространстве за правым штуцером на величину $\delta q_{2(2)}$. Тем самым нарушается равновесное симметричное состояние оболочки $\{M_1A_1A_5M_3\}$. Так как на правой границе перепад давления возрастает от величины $(\Delta q_0 + \delta q_1)$ до величины $(\Delta q_0 + \delta q_1 + \delta q_{2(2)})$, то это вызывает дополнительное усилие в лентах на величину ΔT_2 :

$$\Delta T_2 = \delta q_{2(2)} \cdot \mu(k). \quad (5)$$

Дополнительное усилие в лентах ΔT_2 влечет затягивание оболочки в межтрубный зазор. При этом в области левого штуцера возникает дополнительный участок вне контакта оболочки со стенкой скважины A_1A_2 (рис. 1). При этом правый штуцер перемещается на величину h и возвращается в начальное (исходное) положение M_2N_2 . Сечение меридиана представляет собой линию $M_1A_2A_6M_2$. Принимаем, что перемещение внешней поверхности оболочки по стенке скважины происходит без трения.

Нарушение симметрии нагружения оболочки на левой и правой границах влечет нарушение симметрии сечения меридиана. Сечение меридиана на левой границе представлено дугой окружности M_1A_2 (Рис. 1) с подлежащим определению центральным углом $2\varphi_2$ и радиусом ρ_2 , сечение меридиана на правой границе представлено дугой окружности A_6M_2 с радиусом $r^* = |M_1D_1| = |O_3A_6| = R_1 - r_1$.

Усилие $T_1 + \Delta T_2$ на втором этапе направлено по касательной к дуге (M_1A_2) и образует угол $2\varphi_2$ с направлением оси симметрии оболочки. Из геометрических рассуждений следует, что угол $2\varphi_2$ является

также центральным углом для дуги (M_1A_2) с радиусом ρ_2 . Значение угла $2\varphi_2$, радиуса ρ_2 и длины дополнительного участка A_1A_2 вне контакта оболочки со стенкой скважины определяются формулами:

$$\sin 2\varphi_2 = \frac{T_1}{T_1 + \Delta T_2} = \frac{\Delta q_0 + \delta q_1}{(\Delta q_0 + \delta q_1) + \delta q_{2(2)}}; \quad (6)$$

$$\rho_2 = \frac{r^*}{1 - \cos 2\varphi_2}; \quad (7)$$

$$|A_1A_2| = \rho_2 \cdot \sin 2\varphi_2 - r^*. \quad (8)$$

Из условия нерастяжимости лент и условия сохранения формы правой границы меридиана в виде дуги окружности A_6M_2 предложена расчетная схема деформирования оболочки, согласно которой, сокращение длины участка контакта оболочки со стенкой скважины на величину $|A_1A_2|$ равно длине вновь образовавшегося участка контакта $|A_5A_6|$. Уравнение предложенной расчетной схемы имеет вид:

$$|A_1A_2| = |A_5A_6| = |M_3M_2| = h. \quad (9)$$

Подставляя величину смещения правого штуцера $h = |M_2M_3| = (\pi - 2) \cdot r^*$ в формулы (7)-(9), находим уравнение для центрального угла $2\varphi_2$:

$$\frac{\sin 2\varphi_2}{1 - \cos 2\varphi_2} = \pi - 1. \quad (10)$$

Решением уравнения (10) является значение $2\varphi_2 = 0,8739$ (или $50,07^\circ$). Подстановкой значения начального угла $2\varphi_2 = 0,8739$ в формулу (6) находится вид соотношения между нагрузочными характеристиками δq_1 и $\delta q_{2(2)}$, при котором правый штуцер переместится в начальное положение M_2N_2 :

$$\delta q_{2(2)} = 0,3041 \cdot (\Delta q_0 + \delta q_1). \quad (11)$$

Из формул (3), (5) и (6) следует, что величина угла $2\varphi_2$ определяется: величиной коэффициента пакерования k (определяющим значение давления Δq_0) и соотношением независимых нагрузочных характеристик δq_1 и $\delta q_{2(2)}$ (11). При $2\varphi_2 = 0,8739$ правая граница сечения меридиана ПЭ, вне контакта со стенкой скважины принимает форму окружности A_6M_2 радиуса r^* .

Для всех совокупностей значений давлений $(\delta q_1, \delta q_2)$ расположенных:

- ниже прямой (11), смещение правого штуцера меньше величины h ;
- принадлежащих графику прямой (11), смещение правого штуцера равно h ;
- выше прямой (11), необходимо использовать иную расчетную схему деформирования, отличную от второго этапа.

Из условия нерастяжимости лент, равенства (2) и уравнения расчетной схемы (9) следует, что для второго этапа деформирования длина участка контакта $2L_{k(2)}$ оболочки ПЭ со стенкой скважины равна:

$$2L_{k(2)} = |A_2A_6| = 2L_0 - \pi \cdot r^*. \quad (12)$$

На третьем этапе под действием сброса внешнего давления $\delta q_{2(3)}$ и при условии $\delta q_{2(3)} > \delta q_{2(2)}$ в межтрубном пространстве за правым (нижним) штуцером (переместившимся под действием сброса внешнего давления $\delta q_{2(2)}$ в начальное (исходное) положение M_2N_2) оболочка перемещается вдоль стенки скважины без трения и «продавливается» в межтрубный зазор. Третьему этапу соответствует сечение меридиана $M_1A_3A_7M_2$ (рис. 1): с левой границей в форме дуги окружности A_1A_3 с подлежащим определению центральным углом $2\varphi_3$ и радиусом ρ_3 ; правой границей в форме дуги полуокружности A_7M_2 с радиусом $0,5 \cdot r^*$; участком контакта оболочки со стенкой скважины в предельном состоянии A_2A_7 (Рис. 1).

Дополнительное усилие ΔT_3 в лентах для третьего этапа определится [6-8] формулой:

$$\Delta T_3 = 0,5 \cdot \delta q_{2(3)} \cdot \mu(k). \quad (13)$$

Тогда центральный угол $2\varphi_3$ и радиус ρ_3 дуги M_1A_3 определяется формулами аналогичными (6) и (7) с заменой $\delta q_{2(2)}$ на $\delta q_{2(3)}$. Расчетная схема третьего этапа принимается в виде:

$$|A_1A_3| = |A_5A_6| + |A_6A_7|. \quad (14)$$

Заменой в формулах (6)-(8) угла $2\varphi_2$ на $2\varphi_3$, аналогично расчету по второму этапу, находится уравнение для определения угла $2\varphi_3$:

$$\frac{\sin 2\varphi_3}{1 - \cos 2\varphi_3} = \pi. \quad (15)$$

Решением уравнения (15) является значение угла $2\varphi_3 = 0,6164$ (или $35,32^\circ$), для которого установлено соотношение между нагрузочными характеристиками δq_1 и $\delta q_{2(3)}$ для третьего этапа:

$$\delta q_{2(3)} = 1,46 \cdot (\Delta q_0 + \delta q_1). \quad (16)$$

Из условия нерастяжимости лент и равенства (4) следует выражение для длины участка контакта $2L_{k(3)}$ оболочки ПЭ со стенкой скважины в предельном состоянии, которая определяется формулой (12) с заменой $2L_{k(2)}$ на $2L_{k(3)}$.

На четвертом этапе при дальнейшем сбросе внешнего давления до величины $\delta q_{2(4)}$ при условии $\delta q_{2(4)} > \delta q_{2(3)}$ и неподвижном правом штуцере происходит «затягивание» оболочки в межтрубный зазор с границей $A_7A_8B_3M_2$ (Рис. 1) с образованием дополнительного (в сравнении с третьим этапом) участка контакта оболочки со стенкой скважины A_7A_8 и участка контакта со штоком M_2B_3 (Рис. 1).

Сечение меридиана имеет вид $M_1A_4A_7A_8B_3M_2$ с левой границей в форме дуги окружности A_1A_4 с подлежащими определению: центральным углом $2\varphi_4$; радиусом ρ_4 и длиной участка контакта оболочки со штоком:

$$x = |M_2B_3| = |A_7A_8|. \quad (17)$$

Для четвертого этапа дополнительное усилие в лентах на величину ΔT_4 [5-8] определится формулой:

$$\Delta T_4 = 0,5 \cdot \delta q_{2(4)} \cdot \mu(k). \quad (18)$$

Центральный угол $2\varphi_4$ и радиус ρ_4 дуги M_1A_4 определяется формулами аналогичными (6) и (7) с заменой $\delta q_{2(2)}$ на $\delta q_{2(4)}$.

В качестве основного уравнения расчетной схемы для четвертого этапа принимается равенство:

$$|A_1A_4| = |A_5A_6| + |A_6A_7| + |A_7A_8| + |M_2B_3|. \quad (19)$$

Длина участка $|A_1A_4|$ и величина радиуса ρ_4 определяются теми же формулами, что и для второго этапа – (7) и (8), но с заменой угла $2\varphi_2$ на угол $2\varphi_4$, и заменой радиуса ρ_2 на радиус ρ_4 . Из формулы (19) с учетом введенных обозначений: $x = |A_6A_7| = |M_2B_3|$, $|A_6A_7| = r^*$, $|A_5A_6| = h$ следует уравнение для определения величины участка контакта x на четвертом этапе:

$$x = 0,5 \cdot r_1 \cdot (\kappa - 1) \left[\frac{\sin 2\varphi_4}{1 - \cos 2\varphi_4} - \pi \right]. \quad (20)$$

Из условия $\delta q_{2(4)} \rightarrow \delta q_{2(3)}$ с учетом формулы (15) следует, что $2\varphi_4 \rightarrow 2\varphi_3$ выражение в квадратной скобке в правой части равенства (20) стремится к нулю и, следовательно, $x \rightarrow 0$. То есть расчетная схема четвертого этапа переходит в расчетную схему третьего этапа.

Из условия нерастяжимости лент следует выражение для длины участка контакта $2L_{k(4)}$ оболочки ПЭ со стенкой скважины в состоянии с затеканием оболочки в зазор и образованием участка контакта оболочки со штоком $x > 0$:

$$2L_{k(4)} = 2L_0 - r_1 \cdot (k-1) \frac{\sin 2\varphi_4}{1 - \cos 2\varphi_4} + x. \quad (21)$$

Полученные для четвертого этапа с затеканием оболочки в зазор между стенкой скважины и штоком и образованием участка контакта оболочки со штоком формулы (20) и (21) позволяют для каждого выбранного типоразмера ПЭ, коэффициента пакерования k и рассматриваемой пары независимых нагрузочных характеристик $(\delta q_1, \delta q_2)$ (точка на плоскости изменения переменных δq_1 и δq_2) определять значения усилий в армирующих лентах T , геометрические параметры оболочки ($2\varphi_4$ и ρ_4), длину x участка контакта оболочки со штоком и длину участка контакта оболочки со стенкой скважины $2L_{k(4)}$.

Полученные для первого, второго, третьего и четвертого этапов соотношения и формулы позволяют путем проведения численных экспериментов найти НДС оболочки, оптимизировать конструкцию с выбором наилучшего соотношения геометрических размеров, упругих характеристик резины, количества, размеров и величины перекрытия армирующих лент, а также провести оценку надежности работы оболочки ПЭ. Под надежностью понимается выполнение двух основных условий:

- непревышение усилий $T = T_1 + \Delta T$ в армирующих лентах величины усилия на разрыв $T_{дон}$;
- обеспечение гарантированного контакта оболочки со стенкой скважины.

То есть выполнение условия $2L_k > [2L_k]$, где $2L_k$ – длина участка контакта оболочки со стенкой скважины, а $[2L_k]$ – заданная предельно допустимая минимальная длина участка контакта.

Условие прочности для усилия T в ленте при нагружении оболочки может быть записано в виде:

$$T < \eta \cdot b \cdot h \cdot [\sigma], \quad (22)$$

где: b и h , соответственно, ширина и толщина металлической армирующей ленты, $[\sigma]$ – допустимое напряжение на разрыв для металла ленты, η – коэффициент запаса прочности; величина $T_{дон} = b \cdot h \cdot [\sigma]$ представляет собой предельно допустимое натяжение для ленты.

В качестве минимально допустимой величины длины контакта ПЭ со стенкой скважины $[2L_k]$ принимается значение:

$$[2L_k] = \beta \cdot (2L_0), \quad (23)$$

где β – экспериментально определяемый коэффициент, который для рассматриваемого ряда типоразмеров ПЭ находится в интервале $\beta \in [0,7-0,8]$. То есть условие обеспечения гарантированного контакта оболочки со стенкой скважины принимается в виде:

$$2L_k > [2L_k]. \quad (24)$$

Для выбранных в примере расчета значений коэффициента пакерования k , область допустимых значений $\{\delta q_1, \delta q_{2(4)}\}$ находилась из условия прочности (22) для величины усилия T и условия заданной величины контакта (24) оболочки в скважине $2L_k$.

Согласно предложенной схеме расчета, натяжение в лентах T и длина участка контакта оболочки со стенкой скважины $2L_k$, для каждой принятой в расчете пары значений параметров $\{k_i, \delta q_i\}$, являются функциями величины сброса внешнего давления $\delta q_{2(4)}$, где $k = k_i$ – значения коэффициента пакерования и $\delta q_1 = \delta q_{1i}$ – значения внутреннего рабочего избыточного давления в оболочке (i – номер точки выбранной пары значений параметров $\{k_i, \delta q_i\}$).

Область допустимых значений величины сброса давления $\delta q_{2(4)}$, для которых выполняется условие гарантийного контакта (24) и условие прочности для армирующих лент (22), находится как совместное решение неравенств (22) и (24), которые с учетом формул (20), (21) и (23) приводятся к виду:

$$\frac{\sin 2\varphi_4}{1 - \cos 2\varphi_4} \leq \pi + \frac{4L_0(1 - \beta)}{r_1(k - 1)}; \quad (25)$$

$$\delta q_{2(4)} \leq 2 \left[\frac{T_{дон}}{r_1(k-1)} - (\Delta q_0 + \delta q_1) \right]. \quad (26)$$

Неравенство (25) является нелинейным относительно величины $\delta q_{2(4)}$, поэтому решения неравенств (25) и (26) могут быть получены только численными методами.

В настоящем расчете предложен вариант приближенного решения неравенств (25), (26) расчетно-графическим методом, в котором графики безразмерных зависимостей $T(\delta q_{2(4)}) = \frac{T(\delta q_{2(4)})}{T_{дон}}$ и

$2\bar{L}_k(\delta q_{2(4)}) = \frac{2L_k(\delta q_{2(4)})}{[2L_k]}$ для выбранной при расчете пары параметров $\{k_i, \delta q_i\}$ изображаются совместно на

одном графике. Предложенный переход к безразмерным величинам $\bar{T}$ и $2\bar{L}_k$ позволяет, в первом приближении, получить графически решения неравенств (25), (26). Расчетно-графический метод позволяет с достаточной для практики точностью определять области максимальных значений величины сброса внешнего давления $\delta q_{2(4)}$ в пространстве между стенкой скважины и штоком, при превышении которых будут нарушаться условие прочности для армирующих лент и (или) условие гарантированного контакта ПЭ. Графическое решение неравенств (25), (26) также позволяет находить оптимальную величину коэффициента пакерования k для каждого типоразмера ПЭ, при которой оболочка будет способна воспринимать, без разрушения (обрыва) лент и нарушения герметичности, заданную величину сброса внешнего давления в межтрубном пространстве за правым (нижним) штуцером. Следует отметить, что решение такой оптимизационной задачи может быть проведено и расчетным путем численного решения неравенств (25), (26), но в расчетном варианте снижается наглядность иллюстрации полученных результатов.

Отношение θ длины участка снижения контакта оболочки $|A_1 A_2|$ (рис. 1) со стенкой скважины к начальной длине оболочки $2L_0$ при фиксированных значениях коэффициента пакерования k и фиксированной величине сброса внешнего давления, например, $\delta q_{2(4)} = 100 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$, предлагает рассматриваться как коэффициент податливости оболочки при осевом деформировании в зазоре при изменении величины внутреннего рабочего избыточного давления δq_1 :

$$\theta = \frac{|A_1 A_2|}{2L_0}. \quad (27)$$

В качестве примера проведен расчет НДС оболочки ПЭ по формулам четвертого этапа, с использованием предложенных в настоящей работе расчетных схем деформирования с затеканием оболочки в зазор и образованием участка контакта оболочки со штоком. Характеристики оболочки в примере: внутренний и внешний радиусы, соответственно, равны: $r_0 = 8,9$ см и $r_1 = 10,25$ см; начальная длина $2L_0 = 110$ см; ширина, толщина и количество стальных лент равны, соответственно: $b = 2,8$ см, $h = 0,071$ см, $n = 84$; значение упругой характеристики резиновой камеры оболочки в потенциале Трелоара [1]: $C_1 = 12 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$. Коэффициент

пакерования k , характеризующий величину радиальных деформаций оболочки, варьировался при значениях: $k = 1,25; 1,3; 1,35; 1,4; 1,45; 1,5; 1,55; 1,6$; значение избыточного рабочего давления в оболочке варьировалось при значениях $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$; значение величины сброса внешнего давления $\delta q_{2(4)}$ в за-

трубном пространстве вне оболочки варьировалось в пределах от 40 до 320 $\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$, с шагом 20 $\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$. Резуль-

таты расчетов в форме зависимостей: $\Delta q_0 = \Delta q_0(k)$; $2\varphi_4 = 2\varphi_4(\delta q_{2(4)})$; $x = x(\delta q_1)$; $\theta = \theta(\delta q_1)$ представлены на рисунках рис. 2-5. Зависимость $\Delta q_0 = \Delta q_0(k)$ была получена численно из решения нелинейной задачи радиального деформирования цилиндрического участка оболочки, рассмотренной в работах [2-4] для потенциала Трелоара [1] для описания упругих свойств резины герметизирующего и протекторного слоев в области конечных деформаций.

Рис. 2. Зависимость начального избыточного давления Δq_0 в оболочке от величины коэффициента пакования k . Зависимость получена для оболочки с внутренним и внешним радиусами $r_0 = 8,9$ см и

$r_1 = 10,25$ см, соответственно, и значением упругой характеристики резины $C_1 = 12 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$

Fig. 2. Initial overpressure dependency Δq_0 in the shell from the value of the packing factor k . The dependence is obtained for a shell with internal and external radii $r_0 = 8,9$ cm and $r_1 = 10,25$ cm accordingly and the value

of the elastic characteristics of rubber $C_1 = 12 \frac{\text{kGs}}{\text{cm}^2}$

Рис. 3. Характерные зависимости угла наклона касательной к линии меридиана оболочки $2\varphi_4$ в точке закрепления на левом штуцере при коэффициенте пакования $k = 1,4$ от величины сброса внешнего давления $\delta q_{2(4)}$ для четвертого этапа деформации оболочки с затеканием в зазор и

образованием участка контакта со штоком. Ряды 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям

внутреннего избыточного давления $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$

Fig. 3. Characteristic dependences of the angle of inclination of the tangent to the line of the shell meridian $2\varphi_4$ at the attachment point on the left fitting with a packing factor $k = 1,4$ on the value of external pressure relief $\delta q_{2(4)}$ for the fourth stage of deformation of the shell with flowing into the gap and the formation of the site of contact with the rod. Rows 1, 2, 3, 4, 5 correspond to the values of internal overpressure $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{kGs}}{\text{cm}^2}$

Рис. 4. Зависимости длины участка контакта x оболочки со штоком от величины внутреннего избыточного давления δq_1 , для четвертого этапа деформации оболочки с затеканием в зазор. Ряды 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям коэффициента пакерования $k = 1,3; 1,4; 1,5; 1,6$. Точки на графиках соответствуют значениям величины внутреннего избыточного давления $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

Fig. 4. Dependences of the length of the section of contact x between the shell and the stem on the value of internal overpressure δq_1 for the fourth stage of shell deformation with flowing into the gap.

Rows 1, 2, 3, 4 correspond to values of packing factor $k = 1,3; 1,4; 1,5; 1,6$. Points on graphs correspond to values of internal overpressure value $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

Рис. 5. Зависимость податливости оболочки ПЭ θ от величины внутреннего избыточного рабочего давления δq_1 при воздействии сброса внешнего давления $\delta q_{2(4)} = 100 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ и коэффициенте пакерования

$k = 1,4$. Точки на графике соответствуют значениям $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

Fig. 5. Dependence of the compliance of the shell packer element θ on the value of internal excess worker pressure δq_1 when exposed to external pressure relief $\delta q_{2(4)} = 100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ and packing factor $k = 1,4$. Points on the

graph correspond to the values $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

Так как в примере расчета рассмотрено достаточно большое количество вариантов комбинаций величин k , δq_1 , $\delta q_{2(4)}$, то с учетом однотипности вида зависимостей искомых величин, графическая иллюстрация совмещенных графиков $\bar{T} = \bar{T}(\delta q_4)$ и $2\bar{L}_k = 2\bar{L}_k(\delta q_4)$ в рассмотренном примере приведена для одного значения коэффициента пакерования $k = 1,4$ и $\delta q_1 = 25 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ на рис. 6.

В примере расчета анализ работоспособности оболочки при сбросе внешнего давления $\delta q_{2(4)}$ проведен для всех значений внутреннего избыточного рабочего давления $\delta q_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$. Примерная схема анализа работоспособности оболочки при $\delta q_1 = 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$ с иллюстрацией на Рис. 6. имеет следующий вид. Для значения внутреннего избыточного рабочего давления $\delta q_1 = 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$ область работоспособности оболочки ПЭ ограничивается максимальным значением сброса внешнего давления $\delta q_{2(4)} \leq 320 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$. При этом условие прочности (22) для лент, коэффициент запаса прочности был принят равным $\eta = 1$. Следовательно, использование ПЭ рассматриваемого типоразмера для перекрытия зазора с коэффициентом пакерования $k = 1,4$ при внутреннем избыточном рабочем давлении $\delta q_1 = 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$ не может быть рекомендовано, если возможен сброс внешнего давления в межтрубном пространстве под ПЭ свыше $\delta q_{2(4)} = 320 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$. Причиной отказа работы ПЭ может служить как разгерметизация зазора между ПЭ и скважиной по причине снижения длины участка контакта ПЭ со стенкой $2L_k$ скважины ниже допустимого значения $[2L_k]$, так и превышение допустимого усилия в армирующих лентах. Отсюда можно сделать вывод, что при условии работоспособности ПЭ для обеспечения надежного перекрытия заданного зазора ($k = 1,4$) между ПЭ и стенкой скважины, для рассмотренного в примере типоразмера ПЭ необходимо использовать другой типоразмер с большим начальным внешним диаметром оболочки $2r_1$.

Рис. 6. Зависимости безразмерной длины контакта оболочки со стенкой скважины $2\bar{L}_k = 2\bar{L}_k(\delta q_{2(4)})$ (Ряд 1) и безразмерного усилия в лентах $\bar{T} = \bar{T}(\delta q_{2(4)})$ (Ряд 2) от величины сброса внешнего давления δq_2 . Ряд 3 – предельно допустимая величина контакта оболочки со стенкой скважины. Зависимости

получены для величины внутреннего избыточного рабочего давления $\delta q_1 = 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$

Fig. 6. Dependences of the dimensionless contact length of the shell with the borehole wall $2\bar{L}_k = 2\bar{L}_k(\delta q_{2(4)})$ (Row 1) and dimensionless effort in tapes $\bar{T} = \bar{T}(\delta q_{2(4)})$ (Row 2) on the value of external pressure relief δq_2 . Row 3 – the maximum allowable contact value of the shell with the wall of the well. Dependencies obtained

for the value of internal overpressure $\delta q_1 = 25 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$

На основе полученных в данной работе соотношений (3), (5), (13) и (18) проведен расчет максимальных значений допустимого перепада давления $[\Delta p]$ на правой границе оболочки для следующего ряда величин внешнего диаметра оболочки ПЭ ($D_{\text{нак}} = 2r_1$): $D_{\text{нак}} = 152; 178; 187; 200$ мм. Диаметры скважины ($D_{\text{скв}}$) варьировались с шагом 5 мм в следующих пределах: для $D_{\text{нак}} = 152$ мм – 180-310 мм; для $D_{\text{нак}} = 178$ мм – 220-350 мм; для $D_{\text{нак}} = 187$ мм – 230-380 мм; для $D_{\text{нак}} = 200$ мм – 240-400 мм.

Результаты расчета показали хорошую сходимость с данными приведенными в работе [9]. Вид зависимостей $[\Delta p]$ от диаметра скважины $D_{скв}$ (коэффициента пакерования $k = \frac{D_{скв}}{D_{пак}}$), полученных по предложенной методике, представлен на рис. 7.

Рис. 7. Зависимости предельно допустимых перепадов давления $[\Delta p]$ на правой границе оболочки от диаметра скважины, для величин внешнего диаметра оболочки ПЭ (слева направо): $D_{пак} = 152; 178; 187; 200$ мм.

Fig. 7. Dependences of maximum permissible pressure drops $[\Delta p]$ on the right boundary of the shell from the diameter of the well, for the values of the outer diameter of the shell packer element (from left to right): $D_{пак} = 152; 178; 187; 200$ mm.

Выводы

Для каждого из выделенных при расчете четырех этапов деформирования оболочки получены расчетные формулы для геометрических и силовых характеристик, которые позволяют путем проведения численных экспериментов найти НДС оболочки, оптимизировать конструкцию с выбором наилучшего соотношения геометрических размеров, упругих характеристик резины, количества, размеров и величины перекрытия армирующих лент, а также провести оценку надежности работы оболочки ПЭ.

Таким образом, сформулированы условия надежной работы оболочки при эксплуатации в виде условия не превышения усилий в лентах (усилия в области закрепления лент в штуцерах) максимально допустимого усилия на разрыв для металла лент и условия для минимальной длины участка контакта оболочки со стенкой скважины.

В работе приведен пример расчета оболочки и пример оптимального выбора начальных размеров оболочки и физических характеристик резины герметизирующей камеры и протекторного слоя для обеспечения надежной работы при выбранном коэффициенте пакерования.

Литература

1. Трелоар Л. Физика упругости каучука. М.: Инлит, 1953. 240 с.
2. Грин А., Адкинс Дж. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. М.: Мир, 1965. 456 с.
3. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
4. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
5. Магула В.Э. Судовые эластичные конструкции. Л.: Судостроение, 1978. 255 с.
6. Гимадиев Р.Ш. Динамика мягких оболочек парашютного типа. Казань: Казан. Гос. Энерг. Ун-т, 2006. 208 с.
7. Кузьмина Р.П. Мягкие оболочки. М.: Издательство ЦПИ при мех. матем. Факультете МГУ, 2005. 251 с.
8. Полякова Е.В. и др. Осесимметричная деформация торообразной оболочки из нитей под действием внутреннего давления // Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2009. Вып. 4. С. 89 – 103.
9. Ясашин А.М. Вскрытие, опробование и испытание пластов. М.: Недра, 1979. 344 с.
10. Шехтер Р.С. Вариационный метод в инженерных расчетах. М.: Мир, 1971. 292 с.

References

1. Treloar L. Fizika uprugosti kauchuka. M.: Inlit, 1953. 240 p. (rus.)
2. Grin A., Adkins Dzh. Bol'shie uprugie deformacii i nelinejnaya mekhanika sploshnoj sredy. M.: Mir, 1965. 456 p. (rus.)
3. Lur'e A.I. Teoriya uprugosti. M.: Nauka, 1970. 940 p. (rus.)
4. Lur'e A.I. Nelinejnaya teoriya uprugosti. M.: Nauka, 1980. 512 p. (rus.)
5. Magula V.E. Sudovye elasticheskiye konstrukcii. L.: Sudostroenie, 1978. 255 p. (rus.)
6. Gimadiev R.SH. Dinamika myagkih obolochek parashyutnogo tipa. Kazan': Kazan. Gos. Energ. Un-t, 2006. 208 p. (rus.)
7. Kuz'mina R.P. Myagkie obolochki. M.: Izdatel'stvo CPI pri mekh. matem. Fakul'tete MGU, 2005. 251 p. (rus.)
8. Polyakova E.V. Osesimmetrichnaya deformaciya toroobraznoj obolochki iz nitej pod dejstviem vnutrennego davleniya Vestnik SPbGU. Ser. 1. 2009. 4. P. 89 – 103. (rus.)
9. YAsashin A.M. Vskrytie, oprobovanie i ispytanie plastov. M.: Nedra, 1979. 344 p. (rus.)
10. SHekhтер R.S. Variacionnyj metod v inzhenernyh raschetah. M.: Mir, 1971. 292 p. (rus.)

*Dakhno A.V.**, Director,
Smirnov Yu.P., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Deputy Director for Science and New Technology,
Mashkov A.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Professor,
Ryzhenko E.V., Head of the Intellectual Property Department,
Volzhsky Scientific and Technical Complex (branch)
Volgograd State Technical University, Russia
*Corresponding author E-mail: ois@vntk-org.ru

DEFORMATION OF THE PACKING ELEMENT WHEN THE DIFFERENT PRESSURE IN THE BOREHOLE

Abstract: a method for calculating the stress-deformed condition of the packing element shells reinforced with a system of metal tapes is proposed. The whole process of deformation of the shell under the influence of internal overpressure is conventionally divided into four stages. For each stage, the scheme of deformation of the shell is considered and the solution of the problem is given on the basis of the nonlinear theory of elasticity and the theory of soft shells. All stages of shell deformation considered in this paper are illustrated by the calculation scheme. An example of shell calculation with specified characteristics and deformation conditions is given.

Keywords: packing element, a reinforcing metal tape, the stress-deformed condition, shell, internal overpressure, the borehole wall

Для цитирования: Дахно А.В., Смирнов Ю.П., Машков А.В., Рыженко Е.В. Деформация пакерующего элемента при перепаде давлений в скважине // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №4. С. 27 – 38. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-27-38

For citation: Dakhno A.V., Smirnov Yu.P., Mashkov A.V., Ryzhenko E.V. Deformation of the packing element when the different pressure in the borehole. Construction Materials and Products. 2019. 2 (4). P. 27 – 38. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-27-38

Поступила в редакцию 2 марта 2019 г.
Принята в доработанном виде 15 апреля 2019 г.
Одобрена для публикации 28 мая 2019 г.

Received: March 2, 2019.
Revised: April 15, 2019.
Accepted: May 28, 2019.