DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-2-41-49

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

РАСЧЕТ РУКАВНОГО ПАКЕРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ УКЛАДКИ НИТЕЙ КОРДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТОРЦЕВОЙ ЗАЩИТЫ (ЧАСТЬ 2)

Аннотация: в настоящей части работы исследован случай с переменным по длине углом укладки армирующих нитей пакерующего элемента в срединной и торцевой зонах. Проведен расчет силовых характеристик оболочки пакерующего элемента с различными угловыми коэффициентами. Проведены испытания натуральных опытных образцов оболочек пакерующих элементов. Результаты расчетов, сопоставленные с данными эксперимента, представлены в виде графиков с хорошей степенью сходимости. Разработанная методика позволяет выбрать оптимальную конструкцию оболочек пакерующего элемента с более высоким значением жесткости на торцевых участках, что обеспечивает надежную работу пакерующего элемента при перепадах давления в затрубном пространстве.

Ключевые слова: пакерующий элемент, оболочка, армирующие нити, торцевая защита, угол укладки нитей.

Введение

В первой части предложенной методики расчета теоретически обоснована и технологически определена возможность местного увеличения жесткости торцевой части оболочки пакерующего элемента (далее – ПЭ) с целью повышения его надежности при эксплуатации, за счет предупреждения эффекта затекания оболочки в межтрубный зазор при сбросе давления под ПЭ. Эффективность повышения жесткости и степени деформируемости – раздувания оболочки, определена целым рядом параметров ПЭ, таких как геометрические, конструктивно-технологические (начальная геометрия траектории армирующих нитей), физико-механические характеристики материалов резины и силового каркаса. Оптимальная конструкция ПЭ с местной торцевой защитой на основе использования переменного угла укладки нитей силового каркаса по длине ПЭ, может быть создана на базе целевого выбора силовых характеристик в зависимости от требований, выставляемых потребителем.

Методы и материалы

В общем случае начальная траектория положения нитей силового каркаса на поверхности ПЭ может представлять собой винтовую линию с переменным шагом на первоначально цилиндрической поверхности оболочки. Параметрические уравнения такой винтовой линии в принятой в части 1 форме и с сохранением обозначений всех используемых величин имеют вид:

$$x = u(\sigma); y = r_0 \cdot \cos\left(\frac{\sigma}{r_0}\right); z = r_0 \cdot \sin\left(\frac{\sigma}{r_0}\right). \quad (1)$$

Рис. 1. Фото торцевых участков рукавов в раздутом состоянии при давлении 1,0 МПа: а – рукав с постоянным по всей длине углом укладки армирующих нитей 30°; б – рукав с переменным углом укладки армирующих нитей (срединный участок – 30°, концевой торцевой – 54,7°)

Fig. 1. Photo of end sections of hoses in inflated condition at 1.0 MPa pressure: a – hose with 30 ° constant along the whole length of the reinforcing threads laying angle; b – variable angle hose laying of reinforcing threads (middle section – 30 °, end – 54, 7 °)

На рис. 1 (а, б) представлены, полученные при проведении эксперимента, фотографии торцевых участков рукава в деформированном состоянии при давлении 1,0 МПа. На рис. 1а и 1б, соответственно, представлены: рукав с постоянным по всей длине углом подъема укладки армирующих нитей равным 60° (30° от оси симметрии) и рукав с переменным углом подъема укладки армирующих нитей в срединном участке – под углом 60° и на концевом участке – под углом 35° (54,7° от оси симметрии).

На рис. 1а видно, что для рукава с постоянным углом укладки нитей по длине под действием внутреннего давления происходит монотонное увеличение диаметра рукава от штуцера к срединной части. Для рукава с переменным по длине углом укладки нитей рис. 1б при деформации под действием давления, наблюдается наличие в торцевой части оболочки двух участков. На первом участке длиной 2-3 диаметра оболочки от штуцера имеет место незначительное увеличение диаметра оболочки порядка 10-15 %. Это объясняется повышенным значением жесткости оболочки в этой области за счет малого угла подъема нитей при укладке $\beta_1 = 35^\circ$ и повышенной плотности упаковки нитей с шагом $t_1 = 0,096$ см. На втором участке, отстоящем от штуцера более чем на 3 диаметра, наблюдается плавный переход к области большего диаметра в деформированном состоянии. При этом показатель жесткости оболочки снижается до 4-х раз по отношению к первому участку. Снижение показателя жесткости на втором участке объясняется повышением величины угла подъема нитей при укладке до значения $\beta_2 = 60^\circ$ и большим значением начального шага нитей $t_2 = 0,106$ см.

Как следует из экспериментальных данных (рис. 1а и 1б) в деформированном состоянии при раздувании оболочки ПЭ в области торцевых участков радиус r срединной поверхности оболочки представляет собой функцию осевой координаты $\tilde{x}$, рассматриваемой далее как функция переменной σ (длина дуги базовой окружности):

$$r = r(\tilde{x}(\sigma)) = r(\sigma). \quad (2)$$

При этом начальная траектория нити на цилиндрической поверхности, определяемая уравнениями (1), изменяется за счет изменения радиуса срединной поверхности оболочки (2) и в общем случае определяется параметрическими уравнениями:

$$\tilde{x} = U(\sigma); y = r(\sigma) \cdot \cos\left(\frac{\sigma}{r_0}\right); z = r(\sigma) \cdot \sin\left(\frac{\sigma}{r_0}\right). \quad (3)$$

В уравнениях (1) и (3): $x = u(\sigma)$ – известная непрерывная, монотонно возрастающая и дифференцируемая функция, определяющая осевую координату точек траекторий нити в начальном состоянии; $\tilde{x} = U(\sigma)$ – искомая функция, определяющая осевую координату точек траекторий нити в деформированном состоянии. В частном случае, рассмотренном в части 1, функция $x = u(\sigma)$ представляет собой линейную функцию вида $x = u(\sigma) = k_1 \cdot \sigma$, а винтовая линия представляет собой винтовую линию постоянного шага k_1 . Зависимость жесткости резинокордного материала оболочки W [1] от угла подъема β укладки нитей

определяется, входящим в выражение для W , коэффициентом $\nu(\beta) = 1 + \operatorname{ctg}^4 \beta - \operatorname{ctg}^2 \beta$, значение которого в интервале изменения угла $30^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$ представлено на Рис. 2.

Косинус угла подъема укладки нитей β в недеформированном состоянии определяется величиной производной $u'(\sigma)$ по формуле [2]:

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + (u')^2}}. \quad (4)$$

Зависимость коэффициента $\nu(\beta)$, входящего в показатель жесткости W резинокордного материала, от производной функции $u(\sigma)$, задающей положение армирующей нити на поверхности оболочки в недеформированном состоянии на основе (4) имеет вид:

$$\nu(\beta) = 1 + \frac{1}{(u')^4} - \frac{1}{(u')^2} \quad (u'(\sigma) > 0). \quad (5)$$

Рис. 2. Зависимость коэффициента $\nu(\beta)$ от угла подъема укладки нитей в недеформированном состоянии β в пределах от 30° до 70° с шагом 2° для оболочки выбранных для примера параметров.

Точке 1 соответствует угол 30°

Fig. 2. Dependence of coefficient $\nu(\beta)$ from lifting angle of thread laying in undeformed state β between 30° and 70° with a 2° step for the shell of the parameters selected for the example.

The 1 point corresponds to an angle of 30° .

Из формулы (5) следует, что варьированием функции $x = u(\sigma)$ (то есть заданием соответствующей траектории нити на поверхности оболочки в недеформированном состоянии) может быть достигнуто заданное оптимальное изменение жесткости W вдоль оси оболочки, обеспечивающее необходимое повышенное значение жесткости на концевых участках и надежности торцевой защиты. Следует отметить, что технологическая реализация сборки оболочки ПЭ в условиях серийного производства с нелинейно меняющимся по длине углом укладки нитей (4) представляется трудоемкой. Поэтому в настоящей работе предлагается более практичная технология изготовления оболочек ПЭ с кусочно-линейной аппроксимацией функции $x = u(\sigma)$. В этом случае сохраняется возможность с целью оптимизации конструкции и повышения жесткости оболочки в концевых областях использовать изменения углов укладки нитей вдоль оси оболочки ПЭ.

Некоторые подходы и методы оптимального армирования оболочек вращения из композиционных материалов рассмотрены в работе [3], сопровождаемой достаточно подробной библиографией по данному вопросу. В данной работе, в частности, рассмотрен случай армирования оболочки вращения тороидальной формы лентой с переменным относительно оси углом укладки. Однако при этом оболочка не испытывает при работе радиальных деформаций, что не позволяет использовать изложенный в [3] подход для решения задачи расчета резинокордных оболочек ПЭ, испытывающих при эксплуатации конечные радиальные деформации.

Необходимо отметить, что технологией сборки оболочки ПЭ обеспечивается плавное изменение жесткости оболочки W по длине (рис. 16). Этот факт, с учетом сильной нелинейности зависимости $\nu(\beta)$ от производной $u'(\sigma)$, налагает следующие ограничительные требования на вид функции $u(\sigma)$ – непрерыв-

ность, монотонность и на производную $u'(\sigma)$ – непрерывность, монотонность и дифференцируемость при необходимом условии $u'(\sigma) > 0$.

Во второй части настоящей работы для разработки методики расчета силовых характеристик оболочки ПЭ в случае переменного для двух участков угла начальной укладки нитей по длине оболочки использованы результаты, полученные в первой части данной работы. Данный случай с двумя участками углов начальной укладки нитей следует рассматривать как частный случай общей схемы расчета с функцией $u(\sigma)$ вида:

$$u(\sigma) = k_1 \cdot \sigma \text{ для } \sigma \in [0, \sigma_p]; u(\sigma) = k_2 \cdot (\sigma - \sigma_p) \text{ для } \sigma \in [\sigma_p, \sigma_k]. \quad (6)$$

где: σ_p – значение параметра σ (дуги) соответствующее границе изменения начальных углов укладки; β_1 – начальный угол подъема нитей в области штуцера и β_2 – угол подъема в срединной области оболочки, причем $\beta_1 > \beta_2$ (соответствующие углы наклона нитей к оси равны: $\omega_1 = \frac{\pi}{2} - \beta_1$ и $\omega_2 = \frac{\pi}{2} - \beta_2$); σ_k – значение σ соответствующее точке максимального радиуса срединной поверхности оболочки в деформированном состоянии. Технологически сборка проводится в направлении от середины оболочки к штуцерам. При такой технологии сборки в полосе шириной порядка 6-7 см с центром в точке $\sigma = \sigma_p$ происходит плавный переход угла траектории нити, с увеличением угла подъема от значения $\beta = \beta_2$ в срединной части до значения $\beta = \beta_1$ в области штуцера. В районе полосы перехода $\sigma = \sigma_k$, происходит уплотнение упаковки нитей в концевых областях у штуцеров. То есть шаг нитей в торцевом концевом участке при $\sigma \leq \sigma_k$ меняется от значения t_2 в срединной части до значения t_1 в концевой части, причем $t_2 < t_1$.

Результаты и обсуждения

Для расчета напряженно-деформированного состояния используется как основа расчетная схема первой части. При этом в области штуцера на отрезке изменения параметра $\sigma \in [0, \sigma_p]$, в расчетах используются значения угла подъема $\beta = \beta_1$, значение шага нитей $t = t_1$ и соответствующее расчетное значение параметра K_1 , а для срединной части при $\sigma \in [\sigma_p, \sigma_k]$ значения угла подъема и шага нитей принимаются, соответственно, равными: $\beta = \beta_2$ и $t = t_2$ при соответствующем расчетном значении параметра K_2 . При выполнении численного расчета величины максимального значения радиуса концевой участка b находились методом минимизации потенциала полной энергии. Значение дуги $\sigma = \sigma_p$, соответствующее середине полосы перехода начальной траектории нити на срединном участке к траектории на торцевом участке, принимается в качестве узловой точки $\sigma_i = \sigma_p$ разбиения интервала $[\sigma_0, \sigma_k]$ на N подинтервалов ($i = 1, 2, \dots, N+1$) с шагом $h = \frac{\sigma_k}{N}$. Для точек $0 \leq \sigma \leq \sigma_p$ линейная функция начальной осевой координаты имеет вид $x = u(\sigma) = k_1 \cdot \sigma$, а для точек $\sigma_p \leq \sigma \leq \sigma_k$: $x = u(\sigma) = k_2 \cdot \sigma$. Линейные функции (6) задают на начальной цилиндрической поверхности винтовые линии постоянного шага k_1 и k_2 , совместно представляющие начальную траекторию армирующих нитей с переменным углом укладки, соответственно, β_1 и β_2 . Начальная длина нити L_0 для схемы с переменным углом укладки в части 2 определится формулой [3]:

$$L_0 = \sqrt{1 + k_1^2} \cdot \sigma_p + \sqrt{1 + k_2^2} \cdot (\sigma_k - \sigma_p). \quad (7)$$

Длина нити на концевом участке в деформированном состоянии L для рассматриваемого случая укладки нитей с переменным углом подъема ($\beta = \beta_1$ и $\beta = \beta_2$) определяется формулой:

$$L = \int_0^{\sigma_k} \sqrt{\Phi_1} d\sigma = \int_0^{\sigma_p} \sqrt{\Phi_1} d\sigma + \int_{\sigma_p}^{\sigma_k} \sqrt{\Phi_1} d\sigma, \quad (8)$$

где функция Φ_1 определяется равенством:

$$\Phi_1 = \left(\frac{dr}{d\sigma} \right)^2 + \frac{r^2}{r_0^2} + (U')^2. \quad (9)$$

Условие нерастяжимости армирующих нитей следует из формул (7) и (8) и имеет вид:

$$\int_0^{\sigma_p} \sqrt{\Phi_1} d\sigma + \int_{\sigma_p}^{\sigma_k} \sqrt{\Phi_1} d\sigma = \sqrt{1+k_1^2} \cdot \sigma_p + \sqrt{1+k_2^2} \cdot (\sigma_k - \sigma_p). \quad (10)$$

Узловые значения элемента квадрата длины дуги $(dS_i)^2$ траектории нити в деформированном состоянии $(dS_i)^2 = \Phi_{1i}$ находятся по формуле (9), но с различными для интервалов $\sigma \in [0, \sigma_p]$ и $\sigma \in [\sigma_p, \sigma_k]$ величинами углов подъема β_i , шага нитей $t = t_1$ и $t = t_2$, а также жесткости W_i ($i = 1, 2, \dots, N+1$).

В качестве одного из возможных приближений во второй части расчета принимается, что уравнение меридиана $r = r(\tilde{x})$ на конечном участке $\tilde{x} \in [0, \tilde{x}_m]$ в деформированном состоянии аппроксимируется также как и в части 1 функцией вида:

$$r(\tilde{x}) = b - (b - r_0) \cdot \left(\frac{\tilde{x}_m - \tilde{x}}{\tilde{x}_m} \right)^2, \quad (11)$$

где: в качестве независимой переменной принимается координата точки $\tilde{x}$ срединной поверхности в деформированном состоянии; b – максимальный радиус оболочки при переходе к срединному участку: $b = r(\tilde{x}_m)$.

Для анализа влияния на жесткость и силовые характеристики оболочки внутреннего избыточного давления, начальных углов укладки и плотности упаковки нитей для областей $\sigma \in [0, \sigma_p]$ и $\sigma \in [\sigma_p, \sigma_k]$ рассматривалась оболочка с параметрами: начальный радиус срединной поверхности $r_0 = 5,75$ см; шаг нитей в срединной части $t = 0,106$ см; диаметр нити $d = 0,085$ см; полное число слоев $n = 2$ (один парный слой); модуль упругости резины $G = 12 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$. В расчетах для области $\sigma \in [0, \sigma_p]$ (в окрестности штуцера) угол подъема укладки нитей β_1 варьировался при значениях $\beta_1 = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$, при значении шага $t = t_1 = 0,096$ см. Расчетная зависимость коэффициента жесткости W от величины угла подъема укладки нитей β_1 в торцевой области представлен на Рис. 3. Для области $\sigma \in [\sigma_p, \sigma_k]$ (срединная область оболочки) угол подъема нитей принимался равным $\beta_2 = 60^\circ$ (при всех β_1) и значении шага нитей $t = t_2 = 0,106$ см. С целью возможности сопоставления результатов расчет проводился при одном значении внутреннего давления $p = 4 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$, что не снижает общности расчетной методики.

В аналитическом представлении функции (6), соответствующем двум разным углам укладки нитей на двух участках, производная $u'(\sigma)$ терпит разрыв в точке $\sigma = \sigma_p$. При практической сборке оболочки ПЭ изменение угла укладки происходит плавно в некоторой переходной области от срединного участка к конечному участку. В расчете для переходной области с целью обеспечения гладкого, без разрыва производной, перехода от значения $u'(\sigma) = k_1$ на конечном участке $\sigma \in [0, \sigma_p]$ к значению $u'(\sigma) = k_2$ в срединной области $\sigma \in [\sigma_p, \sigma_k]$ использовалась, в качестве примера, аппроксимация производной $u'(\sigma)$ функцией синуса вида:

$$u'(\sigma) = \frac{k_1 + k_2}{2} + \frac{k_2 - k_1}{2} \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma - \sigma_p}{3h} \right], \quad (12)$$

где $h = \frac{\sigma_k}{N}$ шаг по параметру σ . Ширина переходной области от угла укладки β_1 в концевой области к углу укладки β_2 в срединной области принималась равной $6h$: $\sigma_p - 3h \leq \sigma \leq \sigma_p + 3h$, что соответствует технологии изготовления оболочек ПЭ.

Так как угловые коэффициенты $k_1 = \operatorname{tg} \beta_1 = \operatorname{tg} 35^\circ = 0,7$ для области $\sigma \in [0, \sigma_p]$ и $k_2 = \operatorname{tg} \beta_2 = \operatorname{tg} 60^\circ = 2,75$ для области $\sigma \in [\sigma_p, \sigma_k]$ существенно отличаются, то для аппроксимации искомой функции $U(\sigma)$, определяющей уравнение траектории армирующей нити на поверхности оболочки в деформированном состоянии, использовался полином шестой степени вида:

$$U(\sigma) = u(\sigma) - c_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_p} \right) - c_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_p} \right)^6. \quad (13)$$

Значения неизвестных коэффициентов c_1 и c_2 находились из уравнения нерастяжимости армирующих нитей (10) численно методом координатного спуска [4] по переменным c_1 и c_2 .

При проведении экспериментов и изготовлении опытных образцов была принята конструкция с аппроксимацией непрерывной функции $u(\sigma)$ двумя прямолинейными участками в виде (6) с угловыми коэффициентами $k_1 = \operatorname{tg} \beta_1 = \operatorname{tg} 35^\circ = 0,7$ в концевой части и $k_2 = \operatorname{tg} \beta_2 = \operatorname{tg} 60^\circ = 2,75$ в срединной части. Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены три типоразмера по три образца резинорезиновых рукавов с внутренним диаметром 10 см, толщиной внутренней и наружной резиновых камер по 0,4 см, углами подъема кордных нитей 60° в срединной части и шагом $t = t_2 = 0,106$ см и углом подъема 35° и шагом $t = t_2 = 0,096$ см на концевых участках. Два типоразмера экспериментальных образцов были изготовлены с одним парным силовым слоем и один типоразмер с двумя парными силовыми слоями. Исследования деформационных характеристик рукавов под воздействием внутреннего давления выполняли в соответствии с методикой по испытаниям натуральных образцов рукавов с использованием испытательного устройства (рис. 1). В эксперименте использовали приборы и инструменты метрологически поверенные с погрешностью измерения $\pm 1\%$.

Результаты расчетов и экспериментов приведены на рис. 2 – рис. 6.

Рис. 3. Зависимость жесткости оболочки $W \left(\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2} \right)$ от начального угла укладки нитей β_1 на торцевом

участке для оболочки. Точки на графике соответствуют значениям угла подъема $\beta_1 = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$

Fig. 3. Dependence of rigidity of a cover $W \left(\frac{\text{kGs}}{\text{cm}^2} \right)$ from initial angle of thread laying β_1 at the end section for the

shell. The points on the graph correspond to the values of the angle of elevation $\beta_1 = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$

Рис. 4. Расчетные зависимости значений усилий N (кГс) в армирующих нитях от осевой координаты $\tilde{x}$ в деформированном состоянии при значении внутреннего давления $p = 4 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$. Ряды 1, 2, 3, 4, 5

соответствуют значениям углов укладки нитей на торцевом участке $\beta_1 = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$

Fig. 4. Calculated force value dependencies N (kGs) in reinforcing threads from axial coordinate $\tilde{x}$ in deformed state at internal pressure value $p = 4 \frac{\text{kGs}}{\text{cm}^2}$. Rows 1, 2, 3, 4, 5

correspond to the values of thread laying angles on the end section $\beta_1 = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$

Рис. 5. Расчетные зависимости значений усилий N (кГс) в армирующих нитях от осевой координаты $\tilde{x}$ в деформированном состоянии. Ряды 1, 2, соответствуют значениям

внутреннего избыточного давления в оболочке $p = 2$ и $4 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$

Fig. 5. Calculated force value dependencies N (kGs) in reinforcing threads from axial coordinate $\tilde{x}$ in the deformed state. Rows 1, 2 correspond to internal overpressure values in the shell $p = 2$ и $4 \frac{\text{kGs}}{\text{cm}^2}$

Рис. 6. Расчетные (Ряд 1) и экспериментальные (Ряд 2) данные максимального радиуса оболочки b (см) в центре на срединном участке от значения величины внутреннего избыточного давления p .

Точкам на кривых соответствуют значения внутреннего избыточного давления $p = 2; 4; 6; 8; 10 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

Fig. 6. Calculated (Row 1) and experimental (Row 2) maximum shell radius data b (cm) in the center on the middle section from the value of internal overpressure p .

Points on curves correspond to values of internal overpressure $p = 2; 4; 6; 8; 10 \frac{\text{kGs}}{\text{cm}^2}$

Результаты расчетов, представленные на рис. 5, показывают характер изменения усилий в армирующих нитях $N(\tilde{x})$ для выбранной в примере схемы укладки нитей: $\beta_2 = 60^\circ$ в срединной и $\beta_1 = 35^\circ$ в торцевой части. Из сопоставления расчетных данных для различных значениях внутреннего избыточного давления p следует, что использование двух различных углов укладки нитей дает повышение усилий в нитях в торцевой части по сравнению к значениям в срединной части. Из полученных результатов, по аналогии с теорией расчета усилий в нитях для рукавов [1], следует, что использование выбранной схемы укладки дает перераспределение нагрузок в оболочке ПЭ в сторону роста на армирующие нити на торцевых участках в сравнении со срединным участком. То есть прочность оболочки на торцевых участках повышается при одновременном повышении жесткости, что обеспечивает повышение эффективности торцевой защиты и снижает возможность затекания оболочки ПЭ в межтрубный зазор.

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по величине максимального значения радиуса оболочки ПЭ b в деформированном состоянии при различных значениях внутреннего избыточного давления p представлено на рис. 6. Наибольшие отклонения расчетных данных от экспериментальных по величине максимального радиуса b составляют порядка 5%.

Выводы

1. Разработана общая методика проектирования оптимальной конструкции оболочек ПЭ с переменным по длине коэффициентом жесткости оболочки с более высоким значением жесткости на торцевых участках, что обеспечивает надежную работу ПЭ при перепадах давления в затрубном пространстве. Предложенная методика использует достаточно общую форму задания траектории армирующих нитей в начальном недеформированном состоянии в виде непрерывно и дифференцируемых функций $u(\sigma)$.

2. На основе предложенного общего подхода в качестве частного случая, реализуемого в технологии сборки оболочек, построена методика расчета силовых характеристик оболочки ПЭ для случаев кусочно-линейной аппроксимации функции $u(\sigma)$. Методика позволяет проводить расчеты для двух, трех и более участков линейной аппроксимации функции $u(\sigma)$.

3. В качестве примера проведен расчет силовых характеристик оболочки ПЭ для случая аппроксимации $u(\sigma)$ двумя линейными участками (6) с различными угловыми коэффициентами.

4. Предложенная расчетная методика позволяет проводить количественную оптимизацию конструкции на основе расчета влияния на жесткость и силовые характеристики оболочки ПЭ следующих параметров: геометрических параметров оболочки, физико-механических характеристик резины и армирующих нитей, начальных углов и плотности укладки нитей на торцевом и срединном участках, влияния величины перепада углов укладки при переходе от срединной части к торцевому участку.

5. С целью обоснования достоверности и возможности использования предложенной методики в практике проектирования были проведены испытания натурных опытных образцов оболочек ПЭ с использованием испытательного стенда.

6. Из результатов экспериментов и расчета следует, что для локального повышения жесткости оболочки на торцевом участке и обеспечения надежности торцевой защиты может быть рекомендован участок изменения угла наклона нитей в пределах 1,5-1,8 величины диаметра оболочки в недеформированном состоянии от штуцера.

7. Результаты расчетов, сопоставленные с данными эксперимента, представлены в виде графиков с хорошей степенью совпадения.

Литература

1. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. М.: Машгиз, 1958. Т. 2. 975 с.
2. Смирнов В.И. Курс высшей математики. М.: Изд. Физ. мат. лит., 1962. Т. 2. 628 с.
3. Образцов И.Ф., Васильев В.В. и др. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М. Машиностроение, 1977. 144 с.
4. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 360 с.

References

1. Ponomarev S.D., Biderman V.L. i dr. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. M.: Mashgiz, 1958. 2. 975 p. (rus.)
2. Smirnov V.I. Kurs vysshej matematiki. M.: Izd. Fiz. mat. lit., 1962. 2. 628 p. (rus.)
3. Obrazcov I.F., Vasil'ev V.V. i dr. Optimal'noe armirovanie obolochek vrashcheniya iz kompozicionnyh materialov. M. Mashinostroenie, 1977. 144 p. (rus.)
4. Amosov A.A., Dubinskij YU.A., Kopchenova N.V. Vychislitel'nye metody. M.: Izdatel'skij dom MEI, 2008. 360 p. (rus.)

*Serdyukov N.D., Postgraduate,
Ryzhenko E.V.*, Head of the Intellectual Property Department,
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,
Volzhsky scientific and technical complex (branch)
Volgograd State Technical University, Russia
Corresponding author E-mail: ois@vntk-org.ru

CALCULATION OF THE SLEEVE PACKER ELEMENT WITH THE VARIABLE ANGLE OF LAYING OF THREADS OF THE CORD FOR CREATION OF EDGE PROTECTION (PART 2)

Abstract: in the presented part of work the case with the angle of laying variable longwise of the reinforcing threads of a packer element in median and edge zones is investigated. Calculation of power characteristics of a cover of a packer element with various slopes is carried out. Tests of natural prototypes of covers the packer elements are carried out. The calculation results compared with data of an experiment are presented in the form of schedules with good degree of convergence. The developed technique allows to choose an optimum design of covers of a packer element with higher value of rigidity on face sites that ensures reliable functioning of a packer element at pressure differences in annular space.

Keywords: packer element, cover, the reinforcing threads, edge protection, the angle of laying of threads

Для цитирования: Сердюков Н.Д., Рыженко Е.В., Смирнов Ю.П., Машков А.В. Расчет рукавного пакующего элемента с переменным углом укладки нитей корда для создания торцевой защиты (Часть 2) // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №2. С. 41 – 49. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-2-41-49

For citation: Serdyukov N.D., Ryzhenko E.V., Smirnov Yu.P., Mashkov A.V. Calculation of the sleeve packer element with the variable angle of laying of threads of the cord for creation of edge protection (Part 2). Construction Materials and Products. 2019. 2 (2). P. 41 – 49. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-2-41-49

Поступила в редакцию 15 декабря 2018 г.
Принята в доработанном виде 27 февраля 2019 г.
Одобрена для публикации 2 апреля 2019 г.

Received: December 15, 2018.
Revised: February 27, 2019.
Accepted: April 2, 2019.