

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА
ГИБКИХ ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ РУКАВОВ
ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

**THEORY DEVELOPMENT, CALCULATION METHOD DEVELOPMENT
OF FLEXIBLE FLAT HOSES UNDER THE ACTION
OF INTERNAL HYDRAULIC PRESSURE**

С.Г. СТЕПАНОВ¹, Д.А. БУЛАНОВ², О.А. ДОДОНОВ³, Ю.С. КАБАНОВА³, С.М. СТЕПАНОВА⁴

S.G. STEPANOV¹, D.A. BULANOV², O.A. DODONOV³, Y.S. KABANOVA³, S.M. STEPANOVA⁴

¹Ивановский государственный энергетический университет,

²Ивановский государственный политехнический университет,

³АО «Ивхимпром»,

⁴Ивановский филиал Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова)

¹Ivanovo State University of Energy,

²Ivanovo State Polytechnic University,

³JSC "Ivkhimprom",

⁴Ivanovo branch of the Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov)

E-mail:step-sg@mail.ru

Разработаны теоретические положения по расчету прочности под действием внутреннего гидравлического давления гибких плоскосворачиваемых рукавов, получаемых методом экструзии нагретого жидкого полиуретана через армирующие тканые каркасы. На основе нелинейной теории изгиба гибких нитей и принятых допущений применительно к нитям и материалу, из которого они состоят, получена математическая модель взаимодействия нитей в армирующем тканом каркасе саржевого переплетения гибкого плоскосворачиваемого рукава при внутреннем гидравлическом воздействии жидкости. На основании математической модели получена зависимость, связывающая внутреннее давление в рукаве со средними силами растяжения в уточной нити и связующем (полиуретане), геометрической плотностью уточных нитей тканого армирующего каркаса, радиусом и толщиной стенки гибкого плоскосворачиваемого рукава. Показано, что полученная зависимость остается справедливой и для армирующих каркасов полотняного переплетения.

Theoretical principles have been developed for calculating the strength of flexible flat-fold hoses produced by extruding heated liquid polyurethane through reinforcing woven frames under internal hydraulic pressure. Based on the nonlinear theory of bending of flexible threads and the assumptions made with respect to the threads and the material they consist of, a mathematical model of the interaction of threads in a reinforcing woven frame of twill weave of a flexible flat-fold hose under the internal hydraulic action of a liquid is obtained. The mathematical model has been used to obtain a dependence linking the internal pressure in the hose with the average tensile forces in the weft thread and binder (polyurethane), the geometric density of the weft threads of the woven reinforcing frame, and the radius and wall thickness of the flexible flat-fold hose. It is shown that the obtained dependence remains valid for reinforcing frames of plain weave.

Ключевые слова: гибкие плосковорачиваемые рукава, армирующий тканый каркас, полиуретановое связующее (матрица), внутреннее давление жидкости, математическая модель взаимодействия нитей, расчет на прочность.

Keywords: flexible flat-fold hoses, reinforcing woven frame, polyurethane binder (matrix), internal fluid pressure, mathematical model of thread interaction, strength calculation.

Введение

В [1] рассмотрены назначение, характеристики, устройство, технология производства, проблемы расчета, проектирования и изготовления используемых в различных отраслях гибких плосковорачиваемых рукавов (ГПР), получаемых методом экструзии нагретого жидкого полиуретана через армирующие тканые каркасы.

Следует отметить, что число публикаций по расчету ГПР на основе полиуретанового связующего (матрицы) при действии внутреннего гидравлического давления к настоящему времени невелико (работы [1, 2, 3]). Существенно большее количество публикаций посвящено расчету напорных пожарных рукавов (НПР), которые представляют собой разновидность гибких плосковорачиваемых рукавов, но отличаются от ГПР на основе полиуретана не только материалами (резина, латекс вместо полиуретана), устройством тканого армирующего каркаса (как правило, полотняное переплетение вместо саржевого), но и технологией изготовления и неспособностью выдерживать высокое гидравлическое воздействие.

Основы прочностного расчета НПР при действии внутреннего гидравлического давления заложены д.т.н. Степановым С.Г. и описаны в [4, 5]. Они получили дальнейшее развитие в работах [6...10]. Указанные немногочисленные публикации по расчету ГПР на основе полиуретанового связующего не отражают в полной мере поведение этих изделий при гидравлическом воздействии, а теоретические положения и зависимости для расчета на прочность ГПР при действии внутреннего гидравлического давления не учитывают ряд важных особенностей работы и требуют уточнения.

Во всех этих работах слои резины (латекса), низкомолекулярного полиуретана вообще не учитывались в расчетах, так как принималось, что эти слои обладают несоизмеримо меньшей жесткостью по сравнению с нитями армирующего каркаса (корда). Однако такой подход не лишен недостатков:

1) возрастание неточности при расчете рукавов со связующим с более высоким модулем упругости, т. к. влиянием последнего пренебречь уже нельзя;

2) отсутствие возможности оценки влияния характеристик связующего на прочность рукавов.

При учете связующего мы уходим от рассмотрения чисто волокнистой структуры периодически повторяющегося элемента (ППЭ) армирующего каркаса ГПР к элементам, содержащим полиуретан, т. е. к полимерным композиционным материалам, армированным тканью, которые согласно [15] представляют собой очень сложный для расчета класс композитов в силу следующих особенностей:

1) из-за переплетения нитей (волокон) жесткость и напряженное состояние в пределах ППЭ структуры непрерывно меняется от сечения к сечению, а в пределах любого сечения распределение напряжений имеет сложный неоднородный характер;

2) присущая гибким тканевым композитам геометрическая нелинейность оказывает существенное влияние на их механические характеристики;

3) механические характеристики тканевого композита зависят от вида переплетения нитей армирующей ткани, что существенно усложняет расчет.

Анализ работ по моделированию и расчету тканевых композитов с учетом структурной механики и микронеоднородности

композита, при котором последний принимается гетерогенным материалом и учитывается как волокно, так и связующее [15...22], показал, что при выводе теоретических положений, как правило, используется достаточно широкая система допущений, обусловленная сложностью рассматриваемой задачи.

Ряд исследователей [23...25] пошел по пути использования метода конечных элементов (МКЭ). Однако такой подход уже при расчете сравнительно малой локальной зоны тканевого композита приводит к существенным вычислительным затратам даже при моделировании только его упругого поведения. При моделировании на основе МКЭ нелинейного поведения тканевых композитов или при расчете нагруженных изделий из них, когда нужно будет оперировать сотнями тысяч конечных элементов, трудности могут приобрести непреодолимый характер даже при использовании суперкомпьютерных технологий расчета.

Отметим еще один существенный недостаток большинства перечисленных выше работ [15...25] по расчету тканевых композитов: не учитывается основное геометрическое соотношение, связывающее деформации двух систем нитей в единую систему – однослойную ткань: суммы высот волн изгиба нитей в ППЭ и суммы диаметров нитей с учетом их смятия. Для тканей полотняного переплетения они равны, для тканей других переплетений геометрические соотношения получены в работе [11]. Неучет данных соотношений фактически означает, что каждая система нитей в ППЭ работает независимо от другой, и говорить о таком целостном изделии, как ткань, нельзя.

При этом рассматриваемые математические модели структуры тканевого композита [15...22] и результаты моделирования его напряженно-деформированного состояния на основе МКЭ [23...25] не могут быть использованы для расчета ГПР, поскольку не учитывают целый ряд особенностей работы этих изделий под действием внутреннего давления.

Целью настоящего исследования является развитие теории, разработка более точ-

ной и усовершенствованной методики расчета и проектирования ГПР на основе положений нелинейной механики гибких нитей и теории строения тканей главных переплетений как для выяснения причин разрывов рукавов, так и для создания новых высокотехнологичных видов этих изделий.

Методы исследования

Выполнен анализ структур армирующих каркасов ГПР, который показал, что все они состоят из однослойных бесшовных тканых оболочек саржевого переплетения. По длине ГПР проложены основные нити, которые взаимно переплетены с уточными нитями, располагающимися по его окружности. Армирующий тканый каркас в ГПР воспринимает основную часть нагрузки от воздействия жидкости и обеспечивает высокое рабочее давление трубопровода.

При разработке теоретических положений и выводе уравнения для расчета на прочность ГПР будем использовать основные положения нелинейной теории строения тканей главных переплетений [11]. Принимаем следующие допущения применительно к нитям тканого армирующего каркаса ГПР и материалу, из которого они состоят:

1. Нити состоят из материала, отвечающего требованиям изотропности, однородности и сплошности (геометрические объемы нитей не имеют пустот, их сплошь заполняют тонкие однородные волокна или они состоят из сплошного однородного вещества).

2. Нити обладают жесткостью на изгиб и растяжение.

3. Поперечные нормальные сечения нити, плоские до деформации, остаются плоскими и после деформации (гипотеза плоских сечений Бернулли).

4. Перемещения точек осевой линии нити могут быть большими, но материал нити работает в пределах закона Гука, то есть рассматривается задача в геометрически нелинейной и физически линейной постановке.

В [11] обосновывается необходимость принятия каждого из этих допущений.

Далее будет принят еще ряд допущений, которые целесообразно привести и обосновать по ходу решения задачи.

Рассмотрим равновесие отрезков основной (рис. 1, а) и уточной (рис. 1, б) нитей

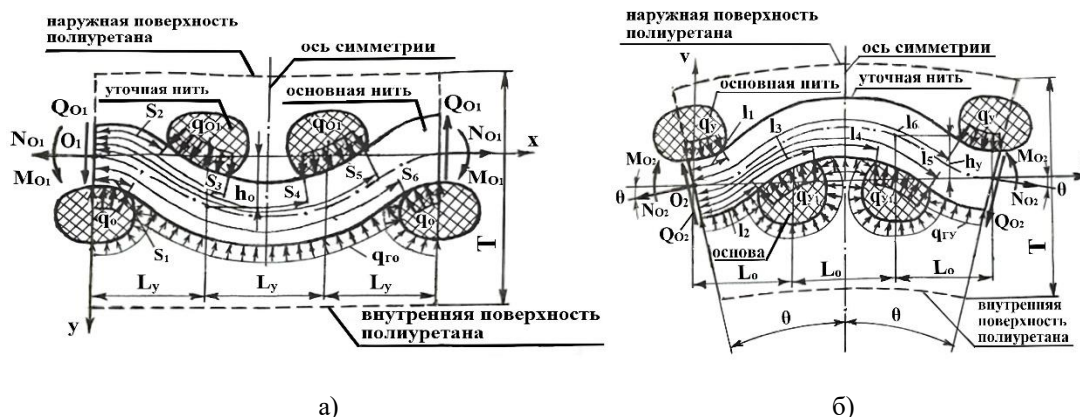


Рис. 1

Поверхности полиуретана условно обозначены пунктирными линиями. В тканом армирующем каркасе ГПР эти отрезки нитей взаимно переплетены, взаимодействуют друг с другом и представляют собой периодически повторяющийся элемент ткани каркаса. На рис. 1 обозначены:

$N_{O1}, N_{O2}, M_{O1}, M_{O2}, Q_{O1}, Q_{O2}$ – соответственно натяжения, изгибающие моменты и поперечные силы в уточной и основной нитях в краевых сечениях;

$q_O, q_V, q_{O1}, q_{V1}, q_{GO}, q_{GV}$ – отнесенные к единице длины распределенные нагрузки, действующие на нити утка и основы, которые принимаем равномерно распределенными и направленными по нормальям к осям и контурам поперечных сечений нитей;

$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ – координаты, определяющие действие распределенных нагрузок в зонах контакта уточины и основы;

O_1, O_2 – начало систем координат vO_1z и uO_2x ;

L_O, L_y – геометрические плотности соответственно по основе и утку;

T – толщина стенки ГПР;

h_O, h_V – прогибы соответственно основы и утка в вертикальных плоскостях, проходящих через центры сечений нитей.

Получим выражения для распределенных нагрузок q_{GO}, q_{GV} , действующих на

тканого армирующего каркаса ГПР на основе переплетения саржа 1/2 без слоев полиуретана под действием внешних и внутренних силовых факторов.

нити утка и основы, обусловленных воздействием внутреннего гидравлического давления в ГПР.

Давление от находящейся внутри рукава жидкости интенсивностью p будет передаваться на внутреннюю поверхность полиуретана и перераспределяться на отрезки нитей. При этом отрезок основной нити будет полностью без потерь воспринимать давление, передаваемое через внутренний слой полиуретана, чего нельзя сказать об отрезке утка со слоем полиуретана, так как только часть давления будет воспринимать уточная нить, а часть – слой полиуретана из-за возникающих натяжений в нити и продольных усилий в их краевых сечениях, обусловленных действием внутреннего давления.

На основании этого заключаем, что при наличии гидравлического давления внутри рукава интенсивностью p на каждую нить по всей ее длине передаются давления, которые в пересчете на единицы длин нитей будут:

для уточной нити

$$q_{GV} = 0,5 \mu_{VB} p L_y, \quad (1)$$

для основной нити

$$q_{GO} = 0,5 p L_O, \quad (2)$$

где μ_{VB} – коэффициент, показывающий, какая часть нагрузки воспринимается уточной нитью ($0 < \mu_{OB} < 1$).

Если добавить к представленным на рис. 1 отрезкам нитей основы и утка слой полиуретана, приходящиеся на каждый из них, то получим ППЭ ткани каркаса со слоями полиуретана стенки ГПР. При этом объем полиуретана, приходящийся на отрезок основы, определяется как разница между объемом параллелепипеда с длиной $3L_0$ и поперечным сечением L_0 на T и объемом изогнутой основной нити, а объем полиуретана, приходящийся на отрезок утка, будет иметь форму изогнутого параллелепипеда с длиной $3L_0$ и поперечным сечением L_0 на T за вычетом объема изогнутой уточной нити.

Нетрудно убедиться, что угол между двумя прямыми, исходящими из центра поперечного сечения ГПР, одна из которых

совпадает с осью симметрии, а вторая проходит через центр поперечного сечения любой из крайних нитей основы (рис. 1, б), с достаточной точностью определяется по формуле:

$$\theta = \frac{1,5L_0}{R + 0,5T}, \quad (3)$$

где R – внутренний радиус стенки ГПР.

Используя в качестве основы нелинейную теорию строения тканей саржевого переплетения [11] и опуская промежуточные выкладки, приведем нелинейную математическую модель взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ГПР саржевого переплетения (саржа 1/2) при действии внутреннего гидравлического давления (рис. 1):

$$A_y \left\{ \frac{d^3 \alpha}{dl^3} - 0,5 \left[\left(\frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \Big|_{l=0} - \left(\frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \right] \frac{d\alpha}{dl} \right\} - N_{o1} \frac{d\alpha}{dl} + q^y = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dz} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

$$A_o \left\{ \frac{d^3 \varphi}{ds^3} - 0,5 \left[\left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \Big|_{s=0} - \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right] \frac{d\varphi}{ds} \right\} - N_{o2} \frac{d\varphi}{ds} + q^o = 0, \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (7)$$

$$\int_{l_2}^{l_3} q_{y1} \cos \alpha \, dl = \int_{s_2}^{s_3} q_{o1} \cos \varphi \, ds, \quad (8)$$

$$\int_0^{l_1} q_y \cos \alpha \, dl = \int_0^{s_1} q_o \cos \varphi \, ds, \quad (9)$$

$$-\int_0^{s_1} q_o \cos \varphi \, ds - \int_0^{s^*} q_{ro} \cos \varphi \, ds + \int_{s_2}^{s_3} q_{o1} \cos \varphi \, ds + \int_{s_4}^{s_5} q_{o1} \cos \varphi \, ds - \int_{s_6}^{s^*} q_o \cos \varphi \, ds = 0, \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
& - \int_0^{l_1} q_Y \cos \alpha \, dl + \int_0^{l^*} q_{ГV} \cos \alpha \, dl + \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos \alpha \, dl + \int_{l_4}^{l_5} q_{V1} \cos \alpha \, dl - \\
& - \int_{l_6}^{l^*} q_Y \cos \alpha \, dl - 2N_{O_2} \sin \theta = 0,
\end{aligned} \tag{11}$$

$$y(q_{O1}) + v(q_{V1}) = 0,5[\eta_{OB}(q_O)d_O + \eta_{VB}(q_V)d_V] + 0,5[\eta_{OB}(q_{O1})d_O + \eta_{VB}(q_{V1})d_V], \tag{12}$$

где

$$q^y = q_V [1 - H(l - l_1) + H(l - l_6)] - q_{V1} [H(l - l_2) - H(l - l_3) + H(l - l_4) - H(l - l_5)] - q_{ГV}; \tag{13}$$

$$q^o = q_O [1 - H(s - s_1) + H(s - s_6)] - q_{O1} [H(s - s_2) - H(s - s_3) + H(s - s_4) - H(s - s_5)] + q_{ГO}. \tag{14}$$

Здесь φ , α – текущие значения углов поворота плоскостей сечений основной и уточной нитей; s , l – текущие координаты изогнутых осей основной и уточной нитей; s^* , l^* – длины деформированных осей основной и уточной нитей в элементе тканого армирующего каркаса; y , x , v , z – координаты произвольной точки осевой линии основной и уточной нитей в осях yO_1x и vO_2z ; A_O , A_V – изгибные жесткости основной и уточной нитей; q^o , q^y – функции, определяющие действие распределенных нагрузок, приложенных к отрезкам основы и утка; d_O , d_V , η_{OB} , η_{VB} – соответственно диаметры и коэффициенты вертикального смятия поперечных сечений нитей основы и утка; $H(l - l_j)$, $H(s - s_j)$ – функции Хевисайда, характеризующие действие распределенных нагрузок на отрезки нитей [12]; $y(q_{O1}) = h_O$; $v(q_{V1}) = h_V$ – прогибы соответственно основы и утка в вертикальных плоскостях, проходящих через центры сечений нитей (рис. 1).

Уравнения (4), (5) и (6), (7) полученной системы уравнений характеризуют равновесие рассмотренных отрезков соответственно уточной и основной нитей в элементе тканого армирующего каркаса саржевого переплетения. Уравнения (8), (9) представляют собой равенство усилий при взаимодействии нитей основы и утка в зонах контакта, (10), (11) – уравнения равенства нулю проекций сил на оси y , v соответственно для основной и уточной нитей. Уравнение (12) – основное геометрическое соотношение (условие совместности прогибов нитей) для тканей саржевого переплетения, связывающего системы уточной и основной нитей. Подробный вывод уравнений (4)-(6) и геометрического соотношения (12) приводится в работе [11].

На основании математической модели (4)-(12) получим формулу для внутреннего гидравлического давления p в ГПР.

Вследствие симметрии отрезков основной и уточной нитей по нагрузке и геометрии и с учетом малости параметра θ (3) ($\sin \theta \approx \theta$) уравнения (10), (11) могут быть записаны в виде

$$- 2 \int_0^{s_1} q_O \cos \varphi \, ds - \int_{s_1}^{s^*} q_{ГO} \cos \varphi \, ds + 2 \int_{s_2}^{s_3} q_{O1} \cos \varphi \, ds = 0, \tag{15}$$

$$- 2 \int_0^{l_1} q_Y \cos \alpha \, dl + 2 \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos \alpha \, dl + \int_0^{l^*} q_{ГV} \cos \alpha \, dl - 2N_{O1} \theta = 0. \tag{16}$$

Используя соотношения (8), (9), приве-

дем (15) к виду:

$$-2 \int_0^{l_1} q_V \cos \alpha dl + 2 \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos \alpha dl = \int_0^{s^*} q_{ГO} \cos \varphi ds . \quad (17)$$

Подставив (17) в (16), получим:

$$\int_0^{l^*} q_{ГV} \cos \alpha dl + \int_0^{s^*} q_{ГO} \cos \varphi ds - 2N_{O1} \theta = 0 . \quad (18)$$

Первый член этого уравнения представляет собой вертикальную равнодействующую от внутреннего давления $q_{ГV}$, приходящегося на отрезок нити утка (рис. 1, б), которая равна согласно [13] гидростатическому давлению жидкости, в нашем случае интенсивности $q_{ГV}$, на проекцию отрезка нити утка на ось z , т. е. на $3L_O$.

Второй член – вертикальная равнодействующая от внутреннего давления $q_{ГO}$ на отрезок нити основы (рис. 1, а), равная гидростатическому давлению жидкости интенсивности $q_{ГO}$ на проекцию отрезка нити основы на ось x , т. е. на $3L_V$. На основании этого из (18) с учетом (1), (2) получаем выражение:

$$0,5\mu_{VB} p L_V 3L_O + 0,5 p L_O 3L_V - 2N_{O1} \theta = 0, \quad (19)$$

Необходимо отметить, что полученное выражение и система (4)-(12) при $\mu_{VB} = 1$ характеризуют взаимодействие нитей при использовании низко модульного связующего (матрицы) (в данном случае низко модульного полиуретана), влиянием которого на изгиб нитей армирующего каркаса и прочность рукава можно пренебречь. Именно такой подход был использован в работах [1...10] при прочностном расчете рукавов под действием внутреннего гидравлического давления, а также в [14] при расчете прочности пневматических шин под действием внутреннего давления воздуха при допущении о том, что вся нагрузка воспринимается только нитями корда.

Результаты и их обсуждение

Изложим разработанный нами подход, который позволяет при системе допущений

получить приближенную формулу для расчета ГПР.

Как уже отмечалось выше, объемы полиуретана, приходящиеся на отрезки основы и утка (см. рис. 1), имеют форму параллелепипеда с указанными размерами. Если вычленишь из объемов этих параллелепипедов объемы, занимаемые изогнутыми нитями, то первые будут иметь искривленные полости. Картина напряженно-деформированного состояния этих параллелепипедов с искривленными полостями под нагрузкой будет иметь чрезвычайно сложный характер, даже если не принимать во внимание взаимодействие полиуретана с волокнами нитей на границе двух фаз. С целью получения удобных формул для инженерных расчетов ГПР с учетом связующего под действием внутреннего гидравлического давления принимаем следующие упрощающие допущения:

- 1) во всех поперечных сечениях рассматриваемых параллелепипедов из полиуретана с искривленными полостями реализуется постоянная средняя продольная сила;
- 2) средняя продольная сила является равнодействующей постоянных средних растягивающих напряжений, действующих в поперечных сечениях параллелепипедов из полиуретана с искривленными полостями;
- 3) площади поперечных сечений параллелепипедов из полиуретана принимаются постоянными по длине и определяются как разницы площадей поперечных сечений параллелепипедов и поперечных сечений нитей;
- 4) нити имеют постоянные по длине поперечные сечения в форме эллипсов, что объясняется смятием нитей от нагрузок.

Принятие некоторых из этих допущений может показаться спорным. Однако необходимо учитывать, что влияние связующего в виде полиуретана носит второстепенный характер по сравнению с влиянием армирующего каркаса из полиэфирных нитей на прочность ГПР. Поэтому принятие упрощающих допущений в таком виде, по нашему мнению, не приведет к появлению существенной неточности в расчетах, а, наоборот, повысит точность расчетов по сравнению со случаем, когда влияние полиуретанового связующего вообще не учитывается.

Уравнение равновесия в виде равенства нулю проекций сил на ось v объема полиуретана с искривленной полостью (без отрезка уточной нити), имеющего форму изогнутого параллелепипеда с длиной $3L_0$ и поперечным сечением L_v на T с продольными силами под углом Θ в краевых сечениях и нагруженного частью внутреннего давления, имеет вид:

$$\sum v = -2N_{YM}\theta + q_{ГП}3L_0 = 0, \quad (20)$$

где $q_{ГП} = 0,5(1 - \mu_{yB})pL_v$ – часть внутреннего давления, воспринимаемая объемом полиуретана и отнесенная к единице его длины; N_{YM} – обусловленная действием внутреннего давления средняя продольная сила в поперечных сечениях параллелепипеда из полиуретана, приходящегося на рассматриваемый отрезок уточины, за вычетом площади поперечного сечения последней.

Складывая левые и правые части уравнений (19) и (20), после преобразований с

учетом (3) и $N_{O2} = N_{yB}$ (N_{yB} – среднее натяжение в уточной нити) имеем:

$$p = \frac{N_{yB} + N_{YM}}{L_y(R + 0,5T)}. \quad (21)$$

Рассмотрим случай, когда армирующий каркас ГПР имеет полотняное переплетение (рис. 2).

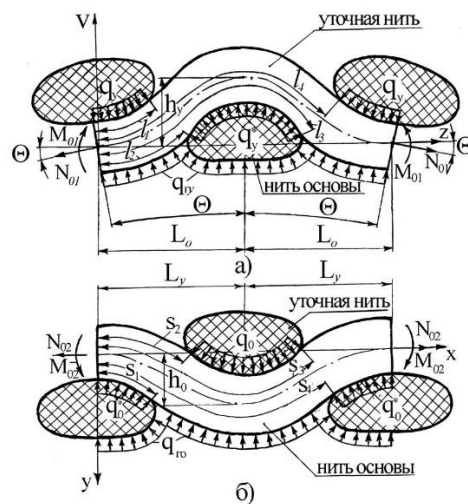


Рис. 2

Нелинейная математическая модель взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ГПР полотняного переплетения при действии внутреннего гидравлического давления близка по структуре к математической модели (4)-(12), но будет иметь следующие отличия:

1) функции q^o , q^y , определяющие действие распределенных нагрузок, приложенных к отрезкам основы и утка, будут иметь вид:

$$q_o = q_o^*[1 - H(s - s_1) + H(s - s_4)] - q_o[H(s - s_2) - H(s - s_3)] + q_{ГO}; \quad (22)$$

$$q_y = q_y[1 - H(l - l_1) + H(l - l_4)] - q_y^*[H(l - l_2) - H(l - l_3)] - q_{ГY}; \quad (23)$$

2) вместо зависимости (3) для угла Θ (рис. 2, а) имеем

$$\Theta = \frac{L_0}{R + 0,5T}; \quad (24)$$

3) вместо (8)-(11) получаем уравнения:

$$\int_{l_2}^{l_3} q_y^* \cos \alpha dl = \int_{s_2}^{s_3} q_o \cos \varphi ds ; \quad (25)$$

$$-2 \int_0^{s_1} q_o^* \cos \varphi ds - \int_0^{s^*} q_{го} \cos \varphi ds + \int_{s_2}^{s_3} q_o \cos \varphi ds = 0 ; \quad (27)$$

$$\int_0^{l^*} q_{гв} \cos \alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_y^* \cos \alpha d\alpha - 2 \int_0^{l_1} q_y \cos \alpha dl - 2N_{o1} \sin \Theta = 0 ; \quad (28)$$

4) вместо геометрического соотношения для тканей саржевого переплетения (12) имеем соотношение Н.Г. Новикова для тканей полотняного переплетения

$$h_o + h_y = d_o \eta_{об} + d_y \eta_{yb} ; \quad (29)$$

5) вместо уравнения (20) получим

$$\sum v = -2N_{vm} \sin \Theta + q_{гп} 2L_o = 0, \quad (30)$$

где

$$q_{гп} = 0,5(1 - \mu_{yb}) pL_y . \quad (31)$$

Используя (25), (26), приведем уравнение (27) к виду

$$-2 \int_0^{l_1} q_y \cos \alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_y^* \cos \alpha dl = \int_0^{s^*} q_{го} \cos \varphi ds . \quad (32)$$

Подставляя (32) в (28) и учитывая, что для малых углов $\sin \Theta \approx \Theta$, получим

$$\int_0^{l^*} q_{гв} \cos \alpha dl + \int_0^{s^*} q_{го} \cos \varphi ds - 2N_{o1} \Theta = 0. \quad (33)$$

Учитывая, что первый и второй члены левой части (33) представляют собой вертикальные равнодействующие от внутренних давлений $q_{гв}$, $q_{го}$, приходящиеся на отрезки нитей, которые равны гидростатическим давлениям жидкости на проекции этих от-

$$\int_0^{l_1} q_y \cos \alpha dl = \int_0^{s_1} q_o^* \cos \varphi ds ; \quad (26)$$

резков на оси z и x (рис. 2), с учетом (1), (2) получим

$$0,5\mu_{yb} pL_y 2L_o + 0,5 pL_o 2L_y - 2N_{o1} \Theta = 0. \quad (34)$$

Складывая левые и правые части (34) и (30), с учетом (31), (24) и $N_{o1} = N_{yb}$ (N_{yb} – среднее натяжение в уточной нити) после преобразований получаем формулу (21).

Таким образом, имеем одну и ту же зависимость (21) для расчета ГПР с тканями армирующими каркасами саржевого и полотняного переплетений.

ВЫВОДЫ

1. На основе нелинейной теории изгиба гибких нитей и принятых допущений применительно к нитям и материалу, из которого они состоят, получена математическая модель взаимодействия нитей в армирующем тканом каркасе саржевого переплетения ГПР при внутреннем гидравлическом воздействии жидкости.

2. На основе полученной математической модели при отсутствии внутреннего гидравлического давления ($q_{гв}=q_{гв}=0$) могут быть определены такие параметры строения ткани армирующего каркаса ГПР, как уработки нитей, высоты изгиба нитей основы и утка и их отношение (порядок фазы строения ткани), формы осевых линий нитей в ткани, длины нитей, сила давления между нитями, толщина и наполнение ткани волокнистым материалом и т. д.

3. На основании математической модели получена зависимость, связывающая внутреннее давление в рукаве со средними силами растяжения в уточной нити и связующем (полиуретане), геометрической плотностью уточных нитей армирующего каркаса, радиусом и толщиной стенки ГПР.

4. Полученная зависимость может быть использована для расчета ГПР, а также близких к ним по структуре НПР с тканями армирующими каркасами саржевого и полотняного переплетений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бахарев Б.А., Степанов С.Г.* Мобильные плосковорачиваемые трубопроводные системы: расчет, проектирование // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2017): сб. матер. XIX междунар. науч.-техн. форума. Иваново, 2017. С. 78...80.

2. *Степанов С.Г., Бахарев Б.А.* Мобильные плосковорачиваемые трубопроводные системы на основе композитов из синтетических нитей и уретановых связующих: назначение, устройство, проблемы проектирования и изготовления // Ключевые тренды в композитах: наука и технологии: сб. матер. междунар. конф. по композитам. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 713...719.

3. *Степанов С.Г., Бахарев Б.А.* Назначение, характеристики, конструкции, проблемы расчета, проектирования и изготовления мобильных плосковорачиваемых трубопроводных систем на основе композитов из тканых армирующих каркасов и полиуретановых связующих // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: сб. матер. XVI междунар. науч.-практ. конф. Нальчик: Принт Центр, 2020. С. 421...425.

4. *Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В.* Математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2010. №8. С. 103...109.

5. *Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В.* Упрощенная математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2011. №1. С. 126...133;

6. *Степанов О.С., Братолобова Е.В., Широков А.А.* Исследование влияния различных факторов на прочность напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2012. № 4. С. 105...108.

7. *Арипбаева А.Е., Мырхалыков Ж.У., Койфман О.И. и др.* Методика расчета и рационального

проектирования армирующих каркасов напорных пожарных рукавов на основе синтетических нитей // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. Вып. 10. С. 83...87.

8. *Арипбаева А.Е., Мырхалыков Ж.У., Койфман О.И. и др.* Перспективное направление в области расчета и проектирования армирующих каркасов напорных пожарных рукавов на основе синтетических нитей // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. Вып. 7. С. 92...95.

9. *Арипбаева А.Е.* Развитие теории, разработка методов расчета и проектирования тканых армирующих каркасов пожарных напорных рукавов: дис. ... д-ра философии (PhD). Шымкент. Республика Казахстан. 2018. 159 с.

10. *Логинова Л.В., Арипбаева А.Е.* О перспективах использования нитей из сверхвысокомолекулярного полиэтилена для производства пожарных напорных рукавов с улучшенными свойствами // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4. С. 111...114.

11. *Чистобородов Г.И., Степанов С.Г., Федоров Ю.А.* Прикладные задачи нелинейной механики гибких нитей. Иваново: ИГАСУ; ИГТА, 2008. 248 с.

12. *Светлицкий В.А.* Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.

13. *Тарасов-Агалаков Н.А.* Практическая гидравлика в пожарном деле. М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1959. 134 с.

14. *Бидерман В.Л.* Механика тонкостенных конструкций. Статика. М., 1977. 488 с.

15. *Композиционные материалы: справочник / под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского.* М.: Машиностроение, 1990. 515 с.

16. *Круклиньш А.А.* Структурные критерии прочности тканевых пластиков // Механика композитных материалов. Рига: Риж. политехн. ин-т, 1984. С. 57...74.

17. *Круклиньш А.А.* Структурная теория пластиков, армированных тканями: дис. ... канд. техн. наук. Рига: Риж. политехн. ин-т, 1985. 180 с.

18. *Naik R.A.* Analysis of woven and braided fabric reinforced composites / NASA CR-194930, 1994. 46 p.

19. *Naik R.A.* Failure analysis of woven and braided fabric reinforced composites / NASA CR-194981, 1994. 47 p.

20. *Edgren F., Asp L.E.* Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites // Composites: Part A. 2005. V. 36. P. 173...181.

21. *Берендеев Н.Н.* Описание поведения тканого композита при статическом нагружении с использованием структурной модели // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 4 (4). С.173...179.

22. *Берендеев Н.Н., Кожанов Д.А., Любимов А.К.* Структурная модель гибкого тканого композита // Проблемы прочности и пластичности. 2015. Т. 77. № 2. С. 162...171.

23. *Verpoest I., Lomov S.V.* Virtual textile composites software Wisetex: integration with micromechanical, permeability and structural analysis // Composites Science and Technology. 2005. Vol. 65. P. 2563...2574.

24. *Lomov S.V., Mikolanda T., Kosek M., Verpoest I.* Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation // Journal of the Textile Institute. 2007. Vol. 98. No. 1. P. 1...13.

25. *Дмитриенко Ю.И. и др.* Моделирование поверхностей прочности композитов на основе микроструктурного конечно-элементного анализа // Наука и образование. 2012. № 11. С. 487...496.

REFERENCES

1. *Bakharev B.A., Stepanov S.G.* Mobile flat-turnable pipeline systems: calculation, design// Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials (SMARTEX-2017): collection of materials. XIX International Scientific and Technical the forum. Ivanovo, 2017. P. 78...80.

2. *Stepanov S.G., Bakharev B.A.* Mobile flat-turnable pipeline systems based on composites made of synthetic yarns and urethane binders: purpose, device, problems of design and manufacture // Key trends in composites: science and technology: collection of materials. International Conferences on Composites. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2019. P. 713...719.

3. *Stepanov S.G., Bakharev B.A.* Purpose, characteristics, designs, problems of calculation, design and manufacture of mobile flat-turnable pipeline systems based on composites from woven reinforcing frames and polyurethane binders // New polymer composite materials. Mikitaev readings: collection of materials of the XVI international scientific and practical conference. Nalchik: Print Center Publishing House, 2020. P. 421...425.

4. *Motorin L.V., Stepanov O.S., Bratolyubova E.V.* A mathematical model for the strength calculation of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2010. No.8. P. 103...109.

5. *Motorin L.V., Stepanov O.S., Bratolyubova E.V.* Simplified mathematical model for strength calculation of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2011. No.1. P. 126...133;

6. *Stepanov O.S., Bratolyubova E.V., Shirokov A.A.* Investigation of the influence of various factors on the strength of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2012. No. 4. P. 105...108.

7. *Aripbaeva A.E., Myrhal'ykov Zh.U., Koifman O.I. et al.* Methods of calculation and rational design of reinforcing frames of pressure fire hoses based on synthetic yarns // News of higher educational

institutions. Chemistry and chemical technology. 2016. Vol. 59, Issue 10. P. 83...87.

8. *Aripbaeva A.E., Myrhal'ykov Zh.U., Koifman O.I. et al.* A promising direction in the field of calculation and design of reinforcing frames of pressure fire hoses based on synthetic yarns // News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology. 2016. Vol. 59. Issue 7. P. 92...95.

9. *Aripbaeva A.E.* Development of theory, development of calculation and design methods for woven reinforcing frames of fire pressure hoses. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD). The Republic of Kazakhstan. Shymkent. 2018. 159 p.

10. *Loginova L.V., Aripbaeva A.E.* On the prospects of using ultrahigh molecular weight polyethylene filaments for the production of fire pressure hoses with improved properties // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2017. No. 4. P. 111...114.

11. *Chistoborodov G.I., Stepanov S.G., Fedorov Yu.A.* Applied problems of nonlinear mechanics of flexible filaments. Ivanovo: IGASU; IGTA, 2008. 248 p.

12. *Svetlitsky V.A.* Mechanics of flexible rods and threads. M.: Mashinostroenie, 1978. 222 p.

13. *Tarasov-Agalakov N.A.* Practical hydraulics in fire fighting. M.: Publishing House of the Ministry of Public Utilities of the RSFSR, 1959. 134 p.

14. *Biderman V.L.* Mechanics of thin-walled structures. Static. M., 1977. 488 p.

15. Composite materials: Handbook / edited by *V.V. Vasilyev and Yu.M. Tarnopolsky.* M.: Mashinostroenie, 1990. 515 p.

16. *Kruklinsh A.A.* Structural criteria of strength of fabric plastics // Mechanics of composite materials. Riga: Riga. politehn. in-t, 1984 P. 57...74.

17. *Kruklins A.A.* Structural chemistry of plastics reinforced with fabrics. Dissertation of the Candidate of technical Sciences. Riga: Riga. politehn. in-t, 1985. 180 p.

18. *Naik R.A.* Analysis of woven and braided fabric reinforced composites / NASA CR-194930, 1994. 46 p.

19. *Naik R.A.* Failure analysis of woven and braided fabric reinforced composites / NASA CR-194981, 1994. 47 p.

20. *Edgren F., Asp L.E.* Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites // Composites:Part A.2005.V.36.P. 173...181.

21. *Berendeev N.N.* Description of the behavior of a woven composite under static loading using a structural model // Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky. 2013. No. 4 (4). P. 173...179.

22. *Berendeev N.N., Kozhanov D.A., Lyubimov A.K.* Structural model of a flexible woven composite//Problems of strength and plasticity. 2015. Vol. 77. No. 2. P. 162...171.

23. *Verpoest I., Lomov S.V.* Virtual textile composites software Wisetex: integration with micromechanical, permeability and structural analysis // Composites Science and Technology. 2005. Vol. 65.

P. 2563...2574.

24. *Lomov S.V., Mikolanda T., Kosek M., Verpoest I.* Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation // *Journal of the Textile Institute*. 2007. Vol. 98. No. 1. P. 1...13.

25. *Dmitrienko Yu.I. et al.* Modeling of composite strength surfaces based on microstructural finite element analysis // *Nauka i obrazovanie*. 2012. No. 11. P. 487...496.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 12.05.24.
