

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497\_2024\_5\_231

**ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ  
ГИБКИХ ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ РУКАВОВ  
ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

**STRENGTH CALCULATION  
OF FLEXIBLE FLAT-FOLDED HOSES  
UNDER INTERNAL HYDRAULIC PRESSURE**

*С.Г. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, Д.А. БУЛАНОВ<sup>2</sup>, О.А. ДОДОНОВ<sup>3</sup>, Ю.С. КАБАНОВА<sup>3</sup>, С.М. СТЕПАНОВА<sup>4</sup>*  
*S.G. STEPANOV<sup>1</sup>, D.A. BULANOV<sup>2</sup>, O.A. DODONOV<sup>3</sup>, Y.S. KABANOVA<sup>3</sup>, S.M. STEPANOVA<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет,

<sup>2</sup>Ивановский государственный политехнический университет,

<sup>3</sup>АО «Ивхимпром»,

<sup>4</sup>Ивановский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова)

(<sup>1</sup>Ivanovo State University of Energy,

<sup>2</sup>Ivanovo State Polytechnic University,

<sup>3</sup>JSC «Ivkhimprom»,

<sup>4</sup>Ivanovo branch of the Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov)

E-mail: step-sg@mail.ru

*Получена зависимость, связывающая внутреннее давление в гибком плоскостворачиваемом рукаве со средними силами растяжения в нитях тканого армирующего каркаса саржевого переплетения, геометрической плотностьюточных нитей, радиусом и толщиной стенки рукава, жесткостными характеристиками нитей и полиуретана. Данная зависимость учитывает увеличение геометрической плотноститочных нитей армирующего каркаса и радиуса рукава, обусловленное действием внутреннего гидравлического давления. Показано, что при расчете и проектировании гибких плоскостворачиваемых рукавов необходимо определять два вида разрывных давлений, обусловленных разрушением какточных, так и основных нитей. Наименьшее из этих двух разрывных давлений является давлением, при котором имеет место разрушение рукава. Полученные условия прочности по основным и точным нитям тканого армирующего каркаса для недопущения разрыва рукавов от действия внутреннего гидравлического давления, а также зависимости для расчета разрывных внутренних давлений являются основой для расчета и проектирования гибких плоскостворачиваемых рукавов.*

*A dependence is obtained that relates the internal pressure in a flexible flat-folded hose with the average tensile forces in the threads of a woven reinforcing frame of twill weave, the geometric density of the weft threads, the radius and wall thickness of the hose, the rigidity characteristics of the threads and polyurethane. This dependence takes into account the increase in the geometric density of the weft threads of the reinforcing frame and the radius of the hose, caused by the action of internal hydraulic pressure. It is shown that in calculating and designing of flexible flat-folded hoses, it is necessary to determine two types of bursting pressures caused by the destruction of both the weft and warp threads. The smallest of these two bursting pressures is the pressure at which the destruction of the hose occurs. The obtained strength conditions for the warp and weft threads of the woven reinforcing frame to prevent rupture of the sleeves from the action of internal hydraulic pressure, as well as the dependencies for calculating the rupture of internal pressures are the basis for the calculation and design of flexible flat-folded hoses.*

**Ключевые слова:** гибкие плосковорачиваемые рукава, армирующий тканый каркас, связующее (полиуретан), внутренние давления, усилия растяжения в нитях.

**Keywords:** flexible flat-folded hoses, reinforcing woven frame, binder (polyurethane), internal pressures, tensile forces in threads.

В [1, рис. 1, а, б] рассмотрено равновесие отрезков основной и уточной нитей тканого армирующего каркаса гибкого плосковорачиваемого рукава (ГПР) на основе саржевого переплетения под действием внешних и внутренних силовых факторов. Там же получена зависимость, связывающая внутреннее давление  $p$  в ГПР со средними силами растяжения в уточной нити  $N_{vB}$  и связующем (полиуретан)  $N_{vM}$ , геометрической плотностью  $L_v$  уточных нитей армирующего каркаса, внутренним радиусом  $R$  и толщиной стенки  $T$  рукава:

$$p = \frac{N_{vB} + N_{vM}}{L_v(R + 0,5T)}. \quad (1)$$

С целью преобразования формулы (1) получим зависимость между  $N_{vM}$  и  $N_{vB}$ .

Рассмотрим отрезок уточной нити со слоем полиуретана между осью  $v$  и осью симметрии до и после деформирования под действием растягивающих усилий, обусловленных действием внутреннего гидравлического давления (рис. 1, а). Этот отрезок соответствует половине отрезка уточины [1, рис. 1, б]. Как уже отмечалось в [1], объем полиуретана, приходящийся на отрезок основы, определяется как разница меж-

ду объемом параллелепипеда с длиной  $3L_v$  и поперечным сечением  $L_o$  на  $T$  и объемом отрезка изогнутой основной нити, а объем полиуретана, приходящийся на отрезок утка, будет иметь форму изогнутого параллелепипеда с длиной  $3L_o$  и поперечным сечением  $L_v$  на  $T$  за вычетом объема отрезка изогнутой уточной нити. 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 фракций. Описать аналитическими методами напряженно-деформированное состояние этих параллелепипедов под нагрузкой, по нашему мнению, чрезвычайно трудно, если вообще возможно. Для устранения данной проблемы и с целью получения удобных формул для инженерных расчетов ГПР с учетом связующего под действием внутреннего гидравлического давления оставляем в силе упрощающие допущения [1], а именно считаем, что во всех поперечных сечениях рассматриваемых параллелепипедов из полиуретана с искривленными полостями, образованными после вычленения объемов нитей, реализуется постоянная средняя продольная сила, являющаяся рав-

нодействующей постоянных средних растягивающих напряжений, действующих в поперечных сечениях параллелепипедов из полиуретана с искривленными полостями; площади поперечных сечений параллелепипедов из полиуретана принимаются постоянными по длине и определяются как разницы площадей поперечных сечений параллелепипедов и поперечных сечений нитей; нити имеют постоянные по длине поперечные сечения в форме эллипсов (форма поперечных сечений нитей в виде эллипса объясняется смятием нитей от нагрузок), и

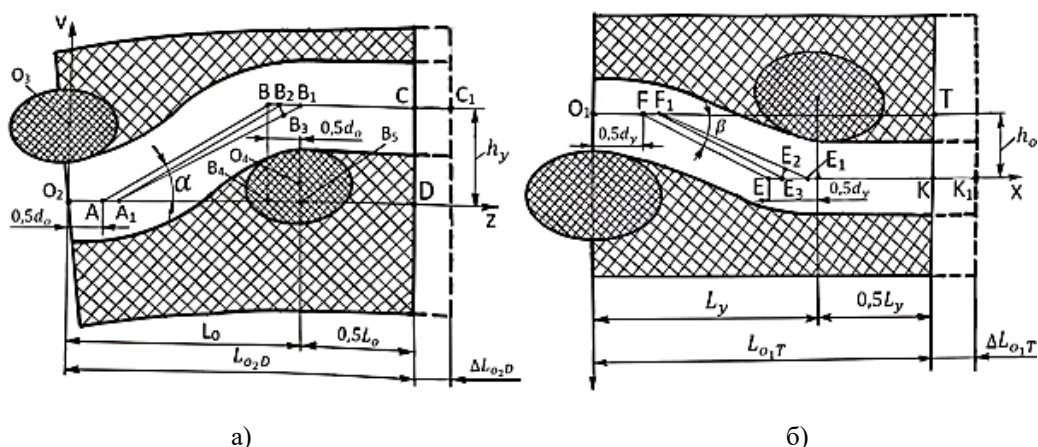


Рис. 1

Отрезок уточной нити со слоем полиуретана будет находиться в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, но с учетом принятых ранее упрощающих допущений все сводится к учету лишь растягивающих усилий в нити и полиуретане. Рассмотрим деформирование системы при условии, что растяжение нити и связующего подчиняется закону Гука, а эффектом Пуассона можно пренебречь. Считаем, что вдоль оси уточной нити действует постоянная по величине средняя продольная сила  $N_{VB}$ . Под действием этой силы уточина продеформируется, в результате чего ломаная  $O_2ABC$  займет положение  $O_2A_1B_1C_1$ , при этом: 1) отрезок нити  $O_2A$  получит удлинение  $AA_1$ ; 2) наклонный отрезок нити утка  $AB$  после деформирования займет новое положение  $A_1B_1$  и получит удлинение  $B_1B_3$ , которому будет соответствовать по оси  $z$  удлинение  $B_1B_2$ ; вместе с тем  $B_1B_2$  будет также удлинением связующего на участке  $AB_4$  длиной  $L_0 - d_0$  (рис. 1, а),

в них возникают постоянные по величине средние усилия растяжения. 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.

Изогнутую ось отрезка уточины будем аппроксимировать ломаной  $O_2ABC$  (рис. 1, а). При этом считаем, что  $O_2A = B_4B_5 = 0,5d_0$ ,  $O_3, O_4$  – центры поперечных сечений основных нитей.

где  $L_0, d_0$  – соответственно геометрическая плотность по основе и диаметр основной нити; 3) отрезок  $BC$  удлинится и займет новое положение  $B_1C_1$ .

Полное абсолютное удлинение отрезка уточины составит по оси  $z$

$$\Delta l_{O_2ABC} = \Delta l_{O_2A} + \Delta l_{AB}^{np} + \Delta l_{BC}, \quad (2)$$

где  $\Delta l_{O_2A}, \Delta l_{BC}$  – абсолютные удлинения горизонтальных отрезков  $O_2A$  и  $BC$  уточной нити;  $\Delta l_{AB}^{np}$  – приращение по оси  $z$  абсолютного удлинения наклонного отрезка  $AB$ .

Из треугольника  $B_1B_2B_3$  (рис. 1, а), если пренебречь малым изменением угла  $\alpha$ , следует приращение по оси  $z$  абсолютного удлинения наклонного отрезка  $AB$

$$\Delta l_{AB}^{np} = B_1B_2 = \frac{B_1B_3}{\cos \alpha} = \frac{\Delta l_{AB}}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

где  $\Delta l_{AB}$  – абсолютное удлинение наклонного отрезка  $AB$ .

Для  $\cos\alpha$  имеем

$$\cos\alpha = \frac{L_O - d_O}{\sqrt{(L_O - d_O)^2 + h_Y^2}}. \quad (4)$$

С учетом (4) зависимость (3) принимает вид

$$\Delta l_{AB}^{np} = \frac{\Delta l_{AB} \sqrt{(L_O - d_O)^2 + h_Y^2}}{L_O - d_O}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta l_{O_2ABC} &= \Delta l_{O_2A} + \frac{\Delta l_{AB} \sqrt{(L_O - d_O)^2 + h_Y^2}}{L_O - d_O} + \Delta l_{BC} = \frac{N_{YB} l_{O_2A}}{E_{YB} A_{YB}} + \frac{N_{YB} [(L_O - d_O)^2 + h_Y^2]}{E_{YB} A_{YB} (L_O - d_O)} + \frac{N_{YB} l_{BC}}{E_{YB} A_{YB}} = \\ &= \frac{N_{YB} 0,5 d_O}{E_{YB} A_{YB}} + \frac{N_{YB} [(L_O - d_O)^2 + h_Y^2]}{E_{YB} A_{YB} (L_O - d_O)} + \frac{N_{YB} 0,5 (d_O + L_O)}{E_{YB} A_{YB}} = \frac{1,5 L_O N_{YB}}{E_{YB} A_{YB}} (1 + C_Y), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $E_{YB}$ ,  $A_{YB}$  – соответственно модуль упругости при растяжении и площадь поперечного сечения уточной нити;

$$C_Y = \frac{h_Y^2}{1,5 L_O (L_O - d_O)}. \quad (7)$$

Исходя из допущения, что нити имеют эллиптическое сечение, для площади поперечного сечения уточной нити имеем

$$A_{YB} = 0,25 \pi \eta_{YT} \eta_{YB} d_Y^2, \quad (8)$$

где  $d_Y$ ,  $\eta_{YT}$ ,  $\eta_{YB}$  – соответственно диаметр, коэффициенты горизонтального и вертикального смятия поперечных сечений уточной нити.

Из (6) следует абсолютное удлинение, приходящееся на геометрическую плотность по основе  $L_O$ :

$$\Delta L_O = \frac{\Delta l_{O_2ABC}}{1,5} = \frac{L_O N_{YB}}{E_{YB} A_{YB}} (1 + C_Y). \quad (9)$$

С другой стороны, для абсолютного удлинения полиуретана на участке  $1,5 L_O$  имеем:

$$\Delta L_{O_2D} = \frac{1,5 L_O N_{YM}}{E_{YM} A_{YM}}, \quad (10)$$

где  $h_Y$  – прогиб или высота волны изгиба уточной нити (рис. 1, а).

Подставляя (5) в (2) и выражая абсолютные удлинения на каждом участке через среднее натяжение в уточной нити  $N_{YB}$  с помощью закона Гука, получим после преобразований выражение для абсолютного удлинения по оси  $z$  отрезка уточины:

где  $E_{YM}$ ,  $A_{YM}$  – соответственно модуль упругости при растяжении и площадь поперечного сечения полиуретана, приходящегося на отрезок утка:

$$A_{YM} = L_Y T - 0,25 \pi \eta_{YT} \eta_{YB} d_Y^2. \quad (11)$$

Приравнивая правые части (6) и (10) вследствие равенства абсолютных удлинений уточной нити и полиуретана в краевом сечении, после преобразований получим:

$$\frac{N_{YM}}{N_{YB}} = \frac{E_M A_{YM}}{E_{YB} A_{YB}} (1 + C_Y). \quad (12)$$

Рассматривая отрезок основной нити со слоем связующего (полиуретана) между осью  $y$  и осью симметрии (рис. 1, б) до и после деформирования под действием растягивающих усилий и применяя аналогичные рассуждения и выкладки, приходим к следующим зависимостям для отрезка основной нити:

для абсолютного удлинения отрезка основы, приходящегося на геометрическую плотность по утку  $L_Y$ :

$$\Delta L_Y = \frac{L_Y N_{OB}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_O); \quad (13)$$

для зависимости средней продольной силы в слое полиуретана  $N_{OM}$  от среднего натяжения в основной нити  $N_{OB}$

$$\frac{N_{OM}}{N_{OB}} = \frac{E_M A_{OM}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o), \quad (14)$$

где  $\Delta L_V$  – приращение геометрической плотности по утку  $L_V$  тканого армирующего каркаса ГПР, обусловленное удлинением основной нити от действия внутреннего давления;

$$C_o = \frac{h_o^2}{1,5L_V(L_V - d_V)}; \quad (15)$$

$E_{OB}$ ,  $A_{OB}$  – соответственно модуль упругости при растяжении и площадь поперечного сечения основной нити; для последней из-за принятого допущения о форме ее сечения в виде эллипса имеем:

$$A_{OB} = 0,25\pi\eta_{OG}\eta_{OB}d_o^2, \quad (16)$$

$\eta_{OG}$ ,  $\eta_{OB}$  – коэффициенты горизонтального и вертикального смятия поперечных сечений основной нити;  $A_{OM}$  – площадь поперечного сечения полиуретана, приходящегося на отрезок основы:

$$A_{OM} = L_o T - 0,25\pi\eta_{OG}\eta_{OB}d_o^2. \quad (17)$$

Выражая из (12)  $N_{VM}$  и подставляя полученное выражение в (1), после преобразований получим

$$p = \frac{N_{VB} [E_{VB} A_{VB} + E_M A_{VM} (1 + C_V)]}{L_V (R + 0,5T) E_{VB} A_{VB}}. \quad (18)$$

Необходимо отметить, что данная зависимость получена при постоянных значениях величин  $L_V$  и  $R$ . Но, как показывает опыт эксплуатации и испытаний ГПР и близких к ним по структуре пожарных напорных рукавов, уже при рабочих внутренних давлениях имеет место заметное увеличение радиусов и длин этих изделий

(ГОСТ Р 51049-97 [2] допускает увеличение этих параметров при рабочих внутренних давлениях не более 10 % и 5% соответственно).

Разрывные внутренние давления в рукавах, превышающие рабочие в 2...4 раза, вызывают еще большее увеличение радиусов и длин (а следовательно, и геометрических плотностей) этих изделий. Поэтому пренебрежение увеличением этих параметров приведет к существенной неточности в расчетах. Преобразуем (18) с учетом увеличения  $L_V$  и  $R$  от действия внутреннего давления.

Обозначим радиус окружности, совпадающей со срединной линией толщины стенки ГПР, как  $R_{cp.} = R + 0,5T$ . Считаем, что на срединной линии располагается изогнутая уточная нить, отрезок которой представлен на рис. 1, б [1]. Длина этой окружности  $2\pi R_{cp.}$  до нагружения за счет действия внутреннего давления увеличится до значения

$$S_{разр.} = 2\pi(R_{cp.} + \Delta R_{cp.}), \quad (19)$$

где  $\Delta R_{cp.}$  – приращение радиуса окружности, совпадающей со срединной линией толщины стенки ГПР, обусловленное действием внутреннего давления.

Действие внутреннего гидравлического давления в ГПР вызывает появление больших растягивающих усилий и деформаций в нитях, сильного смятия нитей в радиальном направлении в зонах контакта. Поэтому длина окружности, с другой стороны, будет зависеть от деформации уточной нити при растяжении:

$$S_{разр.} = (1 + \varepsilon_V) L_o n_o, \quad (20)$$

где  $\varepsilon_V$  – деформация от растяжения уточной нити, приходящаяся на геометрическую плотность по основе, для которой с учетом (9) получим:

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta L_o}{L_o} = \frac{N_{VB}}{E_{VB} A_{VB}} (1 + C_V), \quad (21)$$

$n_o$  – количество нитей основы в ГПР, для которого имеем:

$$n_o = \frac{2\pi R_{cp.}}{L_o}. \quad (22)$$

Приравнивая правые части (19) и (20), после преобразований с учетом (21) и (22) для радиуса срединной линии толщины

$$R_{cp.} + \Delta R_{cp.} = \left[ 1 + \frac{N_{yB}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y) \right] (R + 0,5T). \quad (23)$$

Приращение геометрической плотности по утку  $\Delta L_y$  тканого армирующего каркаса ГПР, обусловленное действием внутреннего давления, будет происходить за счет деформации основной нити при растяжении

$$L_{y.} + \Delta L_y = (1 + \varepsilon_o) L_{y.}, \quad (24)$$

где  $\varepsilon_o$  – деформация от растяжения основной нити, приходящаяся на геометрическую плотность по утку, для которой с учетом (13) имеем:

$$p = \frac{N_{yB} [E_{yB} A_{yB} + E_M A_{yM} (1 + C_y)]}{\left[ 1 + \frac{N_{OB}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o) \right] L_y \left[ 1 + \frac{N_{yB}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y) \right] (R + 0,5T) E_{yB} A_{yB}}. \quad (27)$$

При действии внутреннего давления  $p$  в ГПР при перекрытии потока жидкости запорной арматурой каждая нить основы и слой связующего, приходящийся на эту нить, будут воспринимать растягивающие

стенки ГПР при действии внутреннего давления получим

$$\varepsilon_o = \frac{\Delta L_y}{L_y} = \frac{N_{OB}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o). \quad (25)$$

С учетом (25) выражение (24) принимает вид

$$L_{y.} + \Delta L_y = \left[ 1 + \frac{N_{OB}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o) \right] L_{y.}. \quad (26)$$

Подставляя в (18) вместо  $R_{cp.} = R + 0,5T$  и  $L_y$  значения для этих величин с учетом приращений по формулам (23) и (26), обусловленных действием внутреннего давления, получим

усилия от действующей на рукав продольной силы  $\pi R^2 p$ :

$$\pi R^2 p = n_o (N_{OB} + N_{OM}). \quad (28)$$

С учетом (14) и (22) последнюю зависимость представим в виде

$$p = \frac{2(R + 0,5T) [E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_o)] N_{OB}}{L_o R^2 E_{OB} A_{OB}}. \quad (29)$$

Из (29) следует условие прочности ГПР по основным нитям при действии внутрен-

него гидравлического давления:

$$N_{OB} = \frac{p L_o R^2 E_{OB} A_{OB}}{2(R + 0,5T) [E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_o)]} \leq N_{разр.}^{OB}, \quad (30)$$

где  $N_{разр.}^{OB}$  – усилие при разрыве основной нити.

Рассмотрим случай, когда условие (30) соблюдается.

Подставив (30) в (27), после преобразований получим зависимость, связывающую

натяжение в уточной нити с внутренним гидравлическим давлением  $p$  и другими характеристиками тканого армирующего каркаса ГПР, которое для недопущения разрыва рукава не должно превышать усилия при разрыве уточной нити  $N_{разр.}^{yB}$ :

$$N_{yB} = \frac{p \left\{ L_y E_{yB} A_{yB} \left[ 2(R + 0,5T)B + L_O R^2 (1 + C_O) \right] \right\}}{2BD - pL_y (1 + C_y) \left[ 2(R + 0,5T)B + pL_O R^2 (1 + C_O) \right]} \leq N_{разр.}^{yB}, \quad (31)$$

где  $B = E_{OB}A_{OB} + E_M A_{OM}(1 + C_O)$ ;  $D = E_{yB}A_{yB} + E_M A_{yM}(1 + C_y)$ .

Выражение (31) представляет собой условие прочности по уточным нитям тканого армирующего каркаса для недопущения разрыва ГПР от действия внутреннего гидравлического давления.

Обозначим внутреннее гидравлическое давление в ГПР, при котором натяжение в

уточной нити становится равным разрывному ( $N_{yB} = N_{разр.}^{yB}$ ) и имеет место разрушение рукава от разрыва уточных нитей, через  $p_{разр.}^y$  и назовем его разрывным давлением. Подставив в (30)  $p = p_{разр.}^y$ , получим выражение для натяжения основной нити в момент разрыва уточины:

$$N_{OB} = \frac{p_{разр.}^y L_O R^2 E_{OB} A_{OB}}{2(R + 0,5T) \left[ E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O) \right]}. \quad (32)$$

Подставив (32) в (27) и выполнив в (27) замены  $N_{yB} = N_{разр.}^{yB}$ ,  $p = p_{разр.}^y$ , учитывая при этом, что  $\frac{N_{разр.}^{yB}}{E_{yB} A_{yB}} = \varepsilon_{разр.}^y$  – деформация при

разрыве уточной нити, после преобразований получим квадратное уравнение относительно  $p_{разр.}^y$ :

$$a(p_{разр.}^y)^2 + b(p_{разр.}^y) + c = 0, \quad (33)$$

для положительного корня которого имеем

$$p_{разр.}^y = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (34)$$

где

$$a = \frac{L_O R^2 (1 + C_O) L_y \left[ 1 + \varepsilon_{разр.}^y (1 + C_y) \right] E_{yB} A_{yB}}{2 \left[ E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O) \right]}; \quad (35)$$

$$b = L_y \left[ 1 + \varepsilon_{разр.}^y (1 + C_y) \right] (R + 0,5T) E_{yB} A_{yB}; \quad (36)$$

$$c = -N_{разр.}^{yB} \left[ E_{yB} A_{yB} + E_M A_{yM} (1 + C_y) \right]. \quad (37)$$

Обозначим внутреннее гидравлическое давление в ГПР, при котором натяжение в основной нити становится равным разрывному ( $N_{OB} = N_{разр.}^{OB}$ ) и имеет место разруше-

ние рукава от разрыва основных нитей, через  $p_{разр.}^o$ . Подставив в (29)  $N_{OB} = N_{разр.}^{OB}$ ,  $p = p_{разр.}^o$ , получим выражение для разрывного внутреннего гидравлического давления, обусловленного разрывом основных нитей:

$$p_{разр.}^o = \frac{2(R + 0,5T) \left[ E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O) \right] N_{разр.}^{OB}}{L_O R^2 E_{OB} A_{OB}}. \quad (38)$$

Разрывные давления (34), (38), характеризующие способность рукавов сопротивляться разрушению от действующего внутреннего гидравлического давления, являются важными параметрами запаса прочности, регламентируемыми ГОСТами и техническими условиями, по которым осуществляется проектирование этих изделий.

Таким образом, при проектировании ГПР необходимо при расчетах определять два вида разрывных давлений  $p_{разр.}^y$  и  $p_{разр.}^o$  и судить о разрушении ГПР при действии внутреннего давления по наименьшему из них. Так, если  $p_{разр.}^y < p_{разр.}^o$ , то ГПР разрушится от разрыва уточных нитей. Такой случай, как правило, чаще встречается на практике. Для надежной и долговечной работы ГПР необходимо, чтобы рабочие (эксплуатационные) внутренние давления в рукавах были в 2...4 раза ниже разрывных (например, согласно ГОСТ Р 51049-97 [2] устанавливается двойное превышение разрывных давлений над рабочими для напорных пожарных рукавов, для ГПР согласно [3] этот показатель составляет не менее 4). Однако такое соотношение может быть нарушено, когда при проектировании ГПР либо будут заложены уточные волокна недостаточной прочности, либо будет использован армирующий каркас с большим значением геометрической плотности по утку  $L_y$ , что согласно (27) снижает  $p_{разр.}^y$ . Расчеты показывают, что в большинстве случаев  $p_{разр.}^y < p_{разр.}^o$  и ГПР разрушается от разрыва уточных нитей. Однако, если при проектировании ГПР будет заложено недостаточное число нитей основы  $n_o$ , что согласно (22) приведет к увеличению геометрической плотности по основе  $L_o$ , а это, в свою очередь, согласно (38) снизит величину  $p_{разр.}^o$ , а также если в качестве основных выбраны нити с низкой разрывной нагрузкой, что согласно той же зависимости (38) также вызовет снижение  $p_{разр.}^o$ , то возможен вариант, когда  $p_{разр.}^o < p_{разр.}^y$ , и разрыв ГПР наступит из-за разрушения основных нитей. И в этом случае необходимо, чтобы рабочие внутренние давления в рукавах были в 2...4 раза ниже разрывных.

Полученные условия прочности по основным (30) и уточным (31) нитям тканого армирующего каркаса для недопущения разрыва рукавов от действия внутреннего гидравлического давления, а также зависимости (34), (38) для расчета разрывных внутренних давлений являются основой для расчета и проектирования ГПР.

В заключение отметим, что данные условия прочности и зависимости остаются справедливыми при расчете как ГПР, так и близких к ним по структуре и являющихся разновидностью первых напорных пожарных рукавов (НПР), обладающих свойством плоскостворачиваемости и имеющих, как правило, тканые армирующие каркасы на основе полотняного переплетения со слоями резины, т. к. исходная зависимость (21) [1] остается такой же в случае НПР. Отличие будет заключаться лишь в наличии слоев резины вместо полиуретана и в формулах для расчета параметров  $C_y$  и  $C_o$ , которые для тканых каркасов полотняного переплетения имеют вид:

$$C_y = \frac{h_y^2}{L_o(L_o - d_o)}, \quad (39)$$

$$C_o = \frac{h_o^2}{L_y(L_y - d_y)}. \quad (40)$$

Данные зависимости были получены при подходе, подобном тому, который был использован при получении формулы (6), но с поправкой на полотняное переплетение.

## ВЫВОДЫ

1. Получена зависимость, связывающая внутреннее давление в рукаве со средними силами растяжения в нитях, геометрической плотностью уточных нитей армирующего каркаса саржевого переплетения, радиусом и толщиной стенки ГПР, жесткостными характеристиками нитей и полиуретана; полученная зависимость учитывает увеличение геометрической плотности уточных нитей армирующего каркаса и радиуса рукава, обусловленное действием внутреннего гидравлического давления.



2. Выведены условия прочности по уточным и основным нитям тканого армирующего каркаса для недопущения разрыва ГПР от действия внутреннего гидравлического давления.

3. Показано, что при расчете и проектировании ГПР необходимо определять два вида разрывных давлений, обусловленных разрушением уточных и основных нитей; получены зависимости для каждого вида разрывных давлений; наименьшее из этих двух разрывных давлений является давлением, при котором имеет место разрушение ГПР.

4. Полученные условия прочности по основным и уточным нитям тканого армирующего каркаса для недопущения разрыва рукавов от действия внутреннего гидравлического давления, а также зависимости для расчета разрывных внутренних давлений являются основой для расчета и проектирования ГПР и НПР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов С.Г., Буланов Д.А., Додонов О.А. и др. Развитие теории, разработка метода расчета гибких

плоскостворачиваемых рукавов при действии внутреннего гидравлического давления // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 4. С. 234...245.

2. ГОСТ Р 51049-97. Основные параметры и размеры пожарных напорных рукавов.

3. Шланги для прокачки нефти, нефтепродуктов и нефтесодержащих вод BF OFFSHORE OIL: Технические условия ТУ 2557-003-11104843-2016 / ООО «БАЛТИКФЛЕКС». СПб., 2016.

#### REFERENCES

1. Stepanov S.G., Bulanov D.A., Dodonov O.A. et al. Theory development, calculation method development of flexible flat hoses under the action of internal hydraulic pressure // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. No 4. P. 234...245.

2. GOST R 51049-97. The main parameters and dimensions of fire pressure hoses.

3. Hoses for pumping oil, petroleum products and oily waters of BF OFFSHORE OIL: Technical specifications TU 2557-003-11104843-2016 / ООО "BALTIKFLEX". St. Petersburg, 2016.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 13.05.24.