

УДК 677.024

**ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ РАСЧЕТА  
РАЗРЫВНОГО ВНУТРЕННЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ  
В ПОЖАРНЫХ НАПОРНЫХ РУКАВАХ**

**DEPENDENCE FOR CALCULATION  
OF DISCONTINUED INTERNAL HYDRAULIC PRESSURE  
IN FIRE PRESSURE HOSES**

*А.Е. АРИПБАЕВА, С.Г. СТЕПАНОВ, Р.Т. КАЛДЫБАЕВ*  
*A.E. ARIPBAYEVA, S.G. STEPANOV, R.T. KALDYBAEV*

(Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан,  
Ивановский государственный политехнический университет, Россия)  
(M. Auezov South Kazakhstan State University, Republic of Kazakhstan,  
Ivanovo State Polytechnical University, Russia)  
E-mail: step-sg@mail.ru

*Получена зависимость для расчета разрывного внутреннего гидравлического давления пожарных напорных рукавов.*

*Dependence is obtained to calculate the rupture internal hydraulic pressure of fire pressure hoses.*

**Ключевые слова:** разрывное внутреннее гидравлическое давление, пожарный напорный рукав, тканый армирующий каркас, разрывное усилие уточных нитей.

**Keywords:** explosive internal hydraulic pressure, fire pressure hose, woven reinforcing cage, bearing strength of weft threads.

Пожарные напорные рукава (ПНР) – одно из основных средств тушения пожаров. Конструктивно они выполнены как плоско-сворачиваемые гибкие трубопроводные системы на тканевой основе со слоями (слоем) резины и служат для подачи огнетушащей жидкости (воды и водных растворов пенообразователей) под давлением на расстояние к месту пожара. По отношению к ПНР чрезвычайно важно требование к их проч-

ности, надежности и работоспособности, так как от этого напрямую зависит положительный результат при тушении пожаров.

Поскольку основной характеристикой прочности ПНР является разрывное внутреннее гидравлическое давление, регламентируемое ГОСТ на пожарные рукава [1], то получение зависимости для расчета разрывного давления представляется нам важной научной и практической задачей.

Основным элементом ПНР, воспринимающим внутреннее давление жидкости, является армирующий каркас, представляющий собой однослойную тканую несущую оболочку полотняного переплетения. Расчет на прочность ПНР сводится в основном к расчету на прочность их армирующего каркаса.

В статьях [2]\*, [3]\* с использованием основных положений нелинейной механики гибких нитей и нелинейной теории строения тканей полотняного переплетения [4] разработаны теоретические основы прочностного расчета ПНР при действии внутреннего гидравлического давления, включающие систему допущений при решении задачи, расчетную и математические модели взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ПНР. Однако некоторые положения данных работ, по нашему мнению, не лишены и недостатков. Так, авторами было принято допущение о том, что длины дуг контакта между нитями равны диаметрам нитей, а деформированная ось основной нити (криволинейный отрезок нити, близкий к синусоидальной кривой) заменялась прямой линией, что сказалось на точности расчетов по формуле (37) [3] разрывного давления в ПНР. Эти допущения привели к тому, что расхождение с экспериментальными данными по разрывным давлениям для ПНР некоторых диаметров составило порядка 10%.

Получим зависимость для расчета разрывного давления ПНР, лишенную отмеченных выше недостатков. При этом теоретические основы прочностного расчета ПНР – система допущений при решении задачи [2], расчетная и обобщенная математические модели взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ПНР (см. [2], система уравнений (25...41)) не изменятся. В [3], как частный случай системы (25...41), получена упрощенная математическая модель (18) при допущениях о малости прогибов нитей и равенстве длин дуг контакта между нитями диаметрам нитей в момент разрыва в тканом армирующем каркасе ПНР. Нетрудно убедиться, используя те же математические выкладки (см. [3], вывод системы (18)), что при отсутствии каких-либо ограничений

по отношению к длинам дуг контакта между нитями упрощенная система примет вид:

$$A_y \frac{d^4 v}{dz^4} - N_{O_1} \frac{d^2 v}{dz^2} + q^y(z) = 0, \quad (1)$$

$$A_o \frac{d^4 y}{dx^4} - N_{O_2} \frac{d^2 y}{dx^2} + q^o(x) = 0, \quad (2)$$

$$q_y^* \beta_o d_o = q_o \beta_y d_y, \quad (3)$$

$$q_y \beta_o d_o = q_o^* \beta_y d_y, \quad (4)$$

$$q_o \beta_y d_y - q_{ГO} (s^* - \beta_y d_y) - q_o^* \beta_y d_y = 0, \quad (5)$$

$$q_{Гy} (\ell^* - \beta_o d_o) + q_y^* \beta_o d_o - q_y \beta_o d_o - 2N_{O1} \theta = 0, \quad (6)$$

$$y|_{x=L_y} \quad v|_{z=L_o} \quad d_o h_{OB} + d_y h_{yB}, \quad (7)$$

где  $v, z, y, x$  – координаты произвольной точки осевой линии уточной и основной нити ткани армирующего каркаса ПНР;  $A_y, A_o$  – изгибные жесткости уточной и основной нитей;  $q_o, q_y, q_o^*, q_y^*, q_{Гy}, q_{Гo}$  – распределенные нагрузки, действующие на нити утка и основы [2] ( $q_{Гy} = pL_y, q_{Гo} = pL_o, p$  – гидравлическое давление внутри пожарного рукава;  $L_o, L_y$  – геометрические плотности ткани армирующего каркаса ПНР по основе и утку);  $q^y, q^o$  – функции, определяющие действие распределенных нагрузок, приложенных к отрезкам утка и основы [2];  $\theta$  – угол между горизонталью и осью уточины в ее краевых сечениях [2];  $N_{O1}$  – натяжение уточины в краевых сечениях [2];  $h^o, h^y$  – высоты волн изгиба отрезков соответственно основной и уточной нитей;  $d_o, d_y, \eta_{OB}, \eta_{yB}$  – соответственно диаметры нитей основы и утка тканого армирующего каркаса ПНР и коэффициенты их вертикального смятия;  $\beta_o, \beta_y$  – коэффициенты, характеризующие длины зон контакта между нитями в армирующем каркасе ПНР в долях диаметров нитей основы и утка;  $s^*, \ell^*$  – длины деформированных осей отрезков соответственно основы и утка в элементе ткани армирующего каркаса ПНР.

Произведя замену в (5) и (6) с помощью равенств (4) и (3), после преобразований

\*Работы выполнены под руководством д.т.н. С.Г. Степанова.

получим

$$q_o \beta_y d_y - q_y \beta_o d_o = q_{ГO} (s^* - \beta_y d_y), \quad (8)$$

$$q_{Гy} (\ell^* - \beta_o d_o) + q_o \beta_y d_y - q_y \beta_o d_o - 2N_{O1} \theta = 0. \quad (9)$$

Подставив (8) в (9), имеем:

$$q_{Гy} (\ell^* - \beta_o d_o) + q_{ГO} (s^* - \beta_y d_y) - 2N_{O1} \theta = 0. \quad (10)$$

Как уже отмечалось в [3], из-за наличия больших растягивающих усилий и сильного смятия нитей в радиальном направлении в зонах контакта нитей тканого армирующего каркаса ПНР, обусловленных действием внутреннего гидравлического давления, имеет место существенное уменьшение кривизны нитей. Нити в тканом армирующем каркасе становятся более пологими. Вследствие этого такие характеристики осевых линий нитей, как высоты волн изгиба, прогибы и углы поворота поперечных сечений нитей, могут быть обоснованно отнесены к малым величинам. Это относится к нитям обеих систем, но в особенности к уточным нитям, расположенным по окружности пожарного рукава. Последние имеют очень малые прогибы, а следовательно, и очень малую высоту волны изгиба ( $h^y \approx 0$ ). В этом случае длина деформированной оси уточины  $\ell^*$  будет близка к удвоенной геометрической плотности по основе, то есть к  $2L_o$ . На основании этого принимаем:

$$\ell^* = 2L_o, \quad h^y = 0. \quad (11)$$

Что касается натяжения основных нитей, то оно существенно уступает натяжению уточных нитей. Последнее приводит к тому, что уточные нити с существенно большим натяжением воздействуют в зонах контакта на основные нити, и последние получают прогибы. Вследствие этого нити основы имеют значительно большие прогибы по сравнению с уточными нитями, что и наблюдается при визуальном осмотре ПНР. Поэтому можно согласиться с выводом авторов работы [3] о том, что ткани армирующих каркасов ПНР при действии внутреннего гидравлического давления имеют по классификации проф. Н.Г. Новикова фазу строения, близкую к IX,

характеризующуюся тем, что уточные нити вытянуты "в струну", имея нулевые прогибы, а основные нити максимально изогнуты. Вместе с тем, нити обеих систем удовлетворяют условию малости прогибов ввиду значительного смятия в радиальном направлении и существенного натяжения в них. С учетом принятого допущения ( $h^y = v|_{z=L_o} = 0$ ) из уравнения (7) следует:

$$h^o = y|_{x=L_y} = d_o h_{OB} + d_y h_{yB}. \quad (12)$$

В формуле (10) остается не найденной длина деформированной оси основной нити  $s^*$ . Получим выражение для  $s^*$ . Введем систему координат  $XO_2Y$  для отрезка основной нити (рис. 1 – геометрия нитей в тканом каркасе пожарного напорного рукава). Нетрудно убедиться, что если бы начало системы  $XO_2Y$  располагалось в точке  $O$  при неизменности направлений осей координат, то деформированная ось основы описывалась бы кривой, близкой к синусоиде [5].

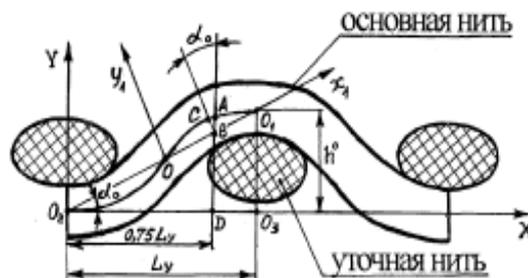


Рис. 1

Введем вспомогательную систему координат  $x_1Oy_1$ , поместив ее начало в точку  $O$  – точку перегиба деформированной оси основы  $O_1OO_2$ . При этом ось  $x_1$  направим так, чтобы она совпадала с линией гипотенузы треугольника  $O_1O_2O_3$  (рис. 1).

Прогиб любой точки отрезка основной нити определяется выражением

$$y = 0,5h^o \left( 1 - \cos \frac{\pi x}{L_y} \right),$$

где  $h_o$  – высота волны изгиба основы.

Так, прогиб отрезка основы в точке А ( $x=0,75L_y$ ) будет:

$$y_A = A_D = 0,5h^\circ[1-\cos(0,75\pi)] = 0,85355h^\circ.$$

Обозначим буквой В точку пересечения прямой AD, перпендикулярной оси X, с гипотенузой  $O_1O_2$  треугольника  $O_1O_2O_3$  (рис. 1). Из точки В проведем прямую, перпендикулярную оси  $x_1$ , до пересечения с деформированной осью основы в точке С. Нетрудно убедиться, что  $\angle ABC = \alpha_0$ .

Из подобия треугольников  $BDO_2$  и  $O_1O_2O_3$  следует:

$$\frac{BD}{O_1O_3} = \frac{0,75L_y}{L_y}.$$

Учитывая, что  $O_1O_3 = h^\circ$ , получим  $BD = 0,75h^\circ$ .

Для отрезка АВ имеем:  $AB = AD - BD = y_A - 0,75h^\circ = (0,85355 - 0,75)h^\circ \approx 0,104h^\circ$ .

Из треугольника ABC следует:  $BC = AB \cos \alpha_0 = 0,104h^\circ \cos \alpha_0$ .

Из треугольника  $O_1O_2O_3$  имеем:

$$\cos \alpha_0 = \frac{O_2O_3}{O_1O_2}.$$

Учитывая, что  $O_2O_3 = L_y$ ,  $O_1O_2 = \sqrt{h^{\circ 2} + L_y^2}$ , для  $\cos \alpha_0$  получим:

$$\cos \alpha_0 = \frac{L_y}{\sqrt{h^{\circ 2} + L_y^2}}.$$

Тогда выражение для BC принимает вид:

$$BC = \frac{0,104h^\circ L_y}{\sqrt{h^{\circ 2} + L_y^2}}.$$

Величина BC является амплитудным значением отрезка  $O_1CAO_1$  синусоиды, построенной относительно оси  $x_1$  в системе коор-

динат  $x_1Oy_1$ . Следовательно, имеем:

$$y_1 = \frac{0,104h^\circ L_y}{\sqrt{h^{\circ 2} + L_y^2}} \sin \frac{2\pi x_1}{L_y^*}, \quad (13)$$

где  $L_y^* = \sqrt{h^{\circ 2} + L_y^2}$ .

На основании формулы для вычисления длины дуги плоской кривой [6] имеем:

$$s_{O_1CAO_1} = \int_0^{0,5L_y^*} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dx_1}\right)^2} dx_1. \quad (14)$$

Считая  $\left(\frac{dy_1}{dx_1}\right)^2$  малой величиной, раз-

ложим выражение под знаком интеграла в ряд, удерживая только два первых члена этого разложения:

$$s_{O_1CAO_1} = \int_0^{0,5L_y^*} \left[ 1 + 0,5 \left(\frac{dy_1}{dx_1}\right)^2 \right] dx_1. \quad (15)$$

Подставив выражение (13) в (15), после интегрирования и преобразований получим:

$$s_{O_1CAO_1} = 0,5(h^{\circ 2} + L_y^2)^{\frac{1}{2}} + 0,053 \frac{h^{\circ 2} L_y^2}{(h^{\circ 2} + L_y^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Длина кривой  $O_1CAO_1$  составляет лишь четверть длины деформированной оси основы. С учетом этого полная длина деформированной оси основной нити составляет:

$$s^* = 4s_{O_1CAO_1} = 2(h^{\circ 2} + L_y^2)^{\frac{1}{2}} + 0,212 \frac{h^{\circ 2} L_y^2}{(h^{\circ 2} + L_y^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

С учетом соотношения (12) выражение для полной длины деформированной оси основной нити принимает вид:

$$s^* = 2[(d_o \eta_{OB} + d_y \eta_{yB})^2 + L_y^2]^{\frac{1}{2}} + 0,212 \frac{L_y^2 (d_o \eta_{OB} + d_y \eta_{yB})^2}{[(d_o \eta_{OB} + d_y \eta_{yB})^2 + L_y^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (16)$$

Подставив выражение (16) в (10) и учитывая, что  $\ell^* = 2L_o$ , получим:

$$q_{ГВ}(2L_o - \beta_o d_o) + q_{ГО} \{ 2[(d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2 + L_y^2]^{\frac{1}{2}} + 0,212 \frac{L_y^2 (d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2}{[(d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2 + L_y^2]^{\frac{3}{2}}} - \beta_y d_y \} - 2N_{O_1} \theta = 0. \quad (17)$$

Из уравнения (17) с учетом формул (1...3) [2] получаем выражение, связывающее натяжение в уточной нити  $N_{O_1}$  и внут-

реннее гидравлическое давление  $p$  в пожарном рукаве:

$$N_{O_1} = \frac{pR}{2L_o} \left\{ L_y(2L_o - \beta_o d_o) + L_o \left\{ 2[(d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2 + L_y^2]^{\frac{1}{2}} + 0,212 \frac{L_y^2 (d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2}{[(d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2 + L_y^2]^{\frac{3}{2}}} - \beta_y d_y \right\} \right\}, \quad (18)$$

где  $R$  – радиус рукава.

Для определения разрывного внутреннего гидравлического давления  $p_{разр}$  в пожарном рукаве по разрывной нагрузке в

уточной нити  $N_{разр}$  в (18) производим замены:  $p=p_{разр}$ ,  $N_{O_1}=N_{разр}$ , и из полученного соотношения выражаем  $p_{разр}$ :

$$p_{разр} = \frac{2N_{разр} L_o}{R \left\{ L_y(2L_o - \beta_o d_o) + L_o \left[ 2(L_y^2 + (d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{0,212 L_y^2 (d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2}{(L_y^2 + (d_o \eta_{ОВ} + d_y \eta_{УВ})^2)^{\frac{3}{2}}} - \beta_y d_y \right] \right\}}. \quad (19)$$

Разрывное давление, определяемое по зависимости (19), является одним из важнейших прочностных параметров ПНР при гидравлическом воздействии. Полученная зависимость может быть положена в основу методики расчета и проектирования ПНР.

## ВЫВОДЫ

Получена зависимость для расчета разрывного внутреннего гидравлического давления в пожарном рукаве, учитывающая, помимо прочих параметров, реальные длины дуг контакта между нитями, близкие к фактической длине деформированной оси основной нити.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 51049–97. Техника пожарная. Рукава пожарные напорные. Общие технические требования. Методы испытания. – М.: Изд-во стандартов, 2008.

2. Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В. Математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010, №8. С. 103...109.

3. Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В. Упрощенная математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №1. С.126...133.

4. Степанов С.Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: Дис. ... докт. техн. наук. – Иваново, 2007.

5. Степанов Г.В. О геометрической форме осевой линии нити в элементе ткани // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1993, № 5. С. 38...41.

6. Musabekov A., Akhadov Zh., Saribayev A., Ismailov S., Sarybay M., Akhylbekov Sh. The study of systems of automation and information support of the optical system of solar power tower // Industrial Technology and Engineering. – №1 (26), 2018. P. 45...55.

7. Натансон И.П. Краткий курс высшей математики. – Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 1999.

## REFERENCES

1. GOST R 51049–97. Tekhnika pozharnaya. Rukava pozharnye napornye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniya. – M.: Izd-vo standartov, 2008.

2. Motorin L.V., Stepanov O.S., Bratolyubova E.V. Matematicheskaya model' dlya prochnostnogo rascheta napornykh pozharnykh rukavov pri gidravlicheskom vozdeystvii // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2010, №8. S. 103...109.

3. Motorin L.V., Stepanov O. S., Bratolyubova E.V. Uproshchennaya matematicheskaya model' dlya prochnostnogo rascheta napornykh pozharnykh rukavov pri gidravlicheskom vozdeystvii // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2011, №.1. S.126...133.

4. Stepanov S.G. Razvitie teorii formirovaniya i stroeniya tkani na osnove nelineynoy mekhaniki gibkikh nitey: Dis. ... dokt. tekhn. nauk. – Ivanovo, 2007.

5. Stepanov G.V. O geometricheskoy forme osevoy linii niti v elemente tkani // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 1993, № 5. S. 38...41.

6. Musabekov A., Akhadov Zh., Saribayev A., Ismailov S., Sarybay M., Akhylbekov Sh. The study of systems of automation and information support of the optical system of solar power tower // Industrial Technology and Engineering. – №1 (26), 2018. P. 45...55.

7. Natanson I.P. Kratkiy kurs vysshey matematiki. – Sankt-Peterburg: Izd-vo Lan', 1999.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования текстильных материалов ЮКГУ им. М. Ауэзова. Поступила 20.10.18.