

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2025_1_268

**ПРОВЕРКА СООТВЕТСТВИЯ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ЗНАЧЕНИЙ РАЗРЫВНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ
В ГИБКИХ ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ РУКАВАХ**

**VERIFICATION OF COMPLIANCE OF CALCULATED AND EXPERIMENTAL
VALUES OF HYDRAULIC BURSTING PRESSURES
IN FLEXIBLE FLAT-FOLD HOSES**

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

Выполнена проверка соответствия расчетных и экспериментальных разрывных внутренних гидравлических давлений гибких плоскосворачиваемых рукавов и являющихся разновидностью первых, близких к ним по структуре напорных пожарных рукавов. Подтвержден высокий уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных по разрывным давлениям. Расчетные значения определялись по ранее полученной зависимости, позволяющей рассчитать разрывное внутреннее гидравлическое давление в рукавах на стадии их проектирования без изготовления опытного образца по усилию при разрыве точной нити, геометрической плотности точных нитей армирующего каркаса, радиусу, толщине стенки, жесткостным характеристикам связующего (полиуретана, резины) и нити и ряду других параметров. Разрывное давление, характеризующее способность рукава сопротивляться разрушению от действующего внутреннего гидравлического давления, является важным параметром запаса прочности, регламентируемым ГОСТами и техническими условиями, по которым осуществляется проектирование этих изделий.

The conformity check of the calculated and experimental bursting internal hydraulic pressures of flexible flat-fold hoses and pressure fire hoses, which are a type of the first hoses and are close to them in structure, was performed. A high level of conformity of the calculated and experimental data on bursting pressures was confirmed. The calculated values were determined using the previously obtained dependence, which allows calculating the bursting internal hydraulic pressure in the hoses at the design stage without making a prototype based on the force at rupture of the weft thread, the geometric density of the weft threads of the reinforcing frame, the radius, the wall thickness, the rigidity characteristics of the binder (polyurethane, rubber) and thread, and a number of other parameters. The bursting pressure, which characterizes the ability to resist destruction of the hose from the current internal hydraulic pressure, is an important parameter of the safety margin, regulated by GOSTs and technical conditions, according to which these products are designed.

Ключевые слова: гибкие плосковорачиваемые рукава, напорные пожарные рукава, армирующий тканый каркас, связующее (матрица), полиуретан, резина, разрывное внутреннее гидравлическое давление.

Keywords: flexible flat-fold hoses, pressure fire hoses, reinforcing woven frame, binder (matrix), polyurethane, rubber, burst internal hydraulic pressure.

В [1] получены условия прочности и зависимости для расчета гибких плосковорачиваемых рукавов (ГПР) с ткаными армирующими каркасами саржевого переплетения с полиуретановым связующим и близких к ним по структуре напорных пожарных рукавов (НПР), обладающих свойством плосковорачиваемости и имеющих, как правило, тканые армирующие каркасы на основе полотняного переплетения со слоями резины. Там же отмечается, что разрывные давления, характеризующие способность сопротивляться разрушению от внутреннего гидравличе-

ского воздействия ГПР и НПР, являются важными параметрами запаса прочности, регламентируемыми ГОСТами и техническими условиями, по которым осуществляется проектирование этих изделий. В [1] получены зависимости для расчета двух видов разрывных давлений:

1) разрывное давление $p_{разр.}^V$, обусловленное разрывом уточных нитей армирующего каркаса рукава:

$$p_{разр.}^V = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (1)$$

где

$$a = \frac{L_O R^2 (1 + C_O) L_Y [1 + \varepsilon_{разр.}^V (1 + C_Y)] E_{VB} A_{VB}}{2[E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O)]}; \quad (2)$$

$$b = L_Y [1 + \varepsilon_{разр.}^V (1 + C_Y)] (R + 0,5T) E_{VB} A_{VB}; \quad (3)$$

$$c = -N_{разр.}^{VB} [E_{VB} A_{VB} + E_M A_{VM} (1 + C_Y)]; \quad (4)$$

2) разрывное давление $p_{разр.}^O$, обусловленное разрывом основных нитей ар-

мирующего каркаса рукава:

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

где L_O, L_Y – геометрические плотности соответственно по основе и утку тканого армирующего каркаса ГПР (НПР) до воздействия внутреннего гидравлического давления; R, T – внутренний радиус и толщина стенки рукава; E_{OB}, E_{YB} – соответственно модули упругости при растяжении основ-

ной и уточной нитей тканого армирующего каркаса ГПР (НПР); A_{OB}, A_{YB} – соответственно площади поперечных сечений основной и уточной нитей тканого армирующего каркаса ГПР (НПР), для которых из-за принятого допущения о форме их сечений в виде эллипса имеем:

$$A_{OB} = 0,25\pi\eta_{OG}\eta_{OB}d_O^2; A_{YB} = 0,25\pi\eta_{YT}\eta_{YB}d_Y^2; \quad (6)$$

$d_O, \eta_{OG}, \eta_{OB}$ – соответственно диаметр, коэффициенты горизонтального и вертикального смятия поперечных сечений основной нити; $d_Y, \eta_{YT}, \eta_{YB}$ – соответственно диаметр, коэффициенты горизонтального и

вертикального смятия поперечных сечений уточной нити; A_{OM}, A_{YM} – соответственно площади поперечных сечений полиуретана (резины), приходящихся на отрезки основы и утка:

$$A_{OM} = L_O T - 0,25\pi\eta_{OG}\eta_{OB}d_O^2; A_{YM} = L_Y T - 0,25\pi\eta_{YT}\eta_{YB}d_Y^2; \quad (7)$$

$N_{разр.}^{OB}, N_{разр.}^{YB}$ – усилия при разрыве соответственно основной и уточной нитей тканого армирующего каркаса ГПР (НПР); $\varepsilon_{разр.}^Y$ – деформация при разрыве уточной нити; C_Y, C_O – параметры, определяемые выражениями:

для тканых армирующих каркасов саржевого переплетения

$$C_Y = \frac{h_Y^2}{1,5L_O(L_O - d_O)}; \quad (8)$$

$$C_O = \frac{h_O^2}{1,5L_Y(L_Y - d_Y)}; \quad (9)$$

для тканых армирующих каркасов полотняного переплетения

$$C_Y = \frac{h_Y^2}{L_O(L_O - d_O)}; \quad (10)$$

$$C_O = \frac{h_O^2}{L_Y(L_Y - d_Y)}; \quad (11)$$

h_O, h_Y – прогибы соответственно основы и утка в вертикальных плоскостях, проходящих через центры сечений нитей [2, рис. 1] для тканых армирующих каркасов саржевого переплетения или высоты волн изгиба нитей для тканых армирующих каркасов полотняного переплетения [2, рис. 2].

Важным критерием верификации разработанных теоретических положений [1, 2], в том числе и зависимостей для расчета разрывных давлений в ГПР (НПР), является сравнение расчетных результатов по разрывным давлениям, полученных на основании этой теории и формул, с существующими экспериментальными данными. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по разрывным давлениям производилось:

для пяти ГПР – одного диаметром 100 мм производства АО «Ивхимпром» (г. Иваново), трех рукавов диаметром 150 мм и одного рукава диаметром 400 мм (производитель – ООО «Балтикфлекс», г. Санкт-Петербург);

для пяти НПР производства ПО «Берег» (Московская область, пос. Большие Дворы) с внутренними номинальными диаметрами 150 мм, 89 мм, 77 мм, 66 мм, 51 мм под рабочее давление 1,6 МПа.

Для расчета разрывных давлений на основе формул (1)-(11) необходимо определить исходные данные, в том числе и модуль упругости полиуретана, который используется в качестве связующего в ГПР. Модуль упругости полиуретана

определялся в соответствии с ГОСТ 9550-81 «Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе» и ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Методы испытаний на растяжение». Для определения данного модуля в соответствии с указанными стандартами на наружной поверхности ГПР диаметров 100, 150 делались надрезы и извлекались по шесть полосок полиуретана без армирующих волокон длиной 250 мм, шириной 25 мм и с фактической толщиной. Данные полоски полиуретана фиксировались в зажимах испытательной машины для определения физико-механических свойств полиуретановых рукавов ZY6010H (КНР) (рис. 1).

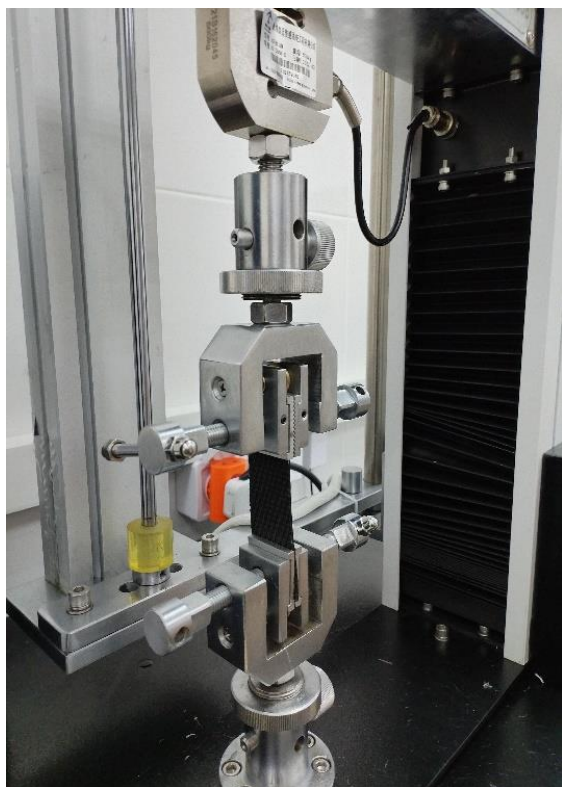


Рис. 1

Далее производилось нагружение каждой из шести полосок полиуретана для ГПР указанных диаметров растягивающими усилиями, подсчитывалось среднеарифметическое значение всех параллельных определений и по результатам испытаний производилось вычисление модуля упругости при растяжении полиуретана.

Изложенная методика определения модуля продольной упругости полиуретана применялась для ГПР диаметром 100 мм и для одного рукава диаметром 150 мм (для других рукавов диаметрами 150 и 400 мм определение модуля упругости при растяжении полиуретана не проводилось, т. к. при их изготовлении использовалась та же марка полиуретана, что и при изготовлении исследуемого рукава диаметром 150 мм).

Анализ тканых армирующих каркасов различных производителей показал, что уточные нити, отличающиеся, как правило, существенно большей линейной плотностью, прочностью, а, следовательно, значительно более высокой изгибной жесткостью по сравнению с основными нитями, изначально (до воздействия внутреннего гидравлического давления) имеют малый изгиб и малые высоты волн изгиба.

Действие внутреннего гидравлического давления в ГПР (НПР), особенно разрывного, вызывает появление больших растягивающих усилий и сильного смятия нитей в радиальном направлении в зонах контакта нитей тканого армирующего каркаса, вследствие чего уточные нити, имеющие существенно более малый изгиб в армирующем каркасе и большие натяжения (достигшие разрывных значений) по сравнению с основными, вытягиваются «в струну» с близкими к нулевым прогибами, выдавливают основные нити, которые получают дополнительный изгиб. На основании вышеизложенного считаем, что при достижении разрывных значений натяжений в уточных нитях прогибы, высоты волн изгиба в последних принимают нулевые значения (по классификации Н.Г. Новикова порядок фазы строения ткани, равный IX), а, следовательно, коэффициент C_y (8), зависящий от прогиба утка h_y в вертикальной плоскости, проходящей через центр сечения нити основы [2, рис. 1, б], можно считать равным нулю. В этом случае из основного геометрического соотношения (условия совместности прогибов нитей) для тканей саржевого переплетения [2, формула (12)] следует выражение для прогиба основной нити:

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

на основе которого определялся коэффициент C_O (9), зависящий от этого параметра, и необходимый для расчета разрывных давлений.

При расчете НПР с тканями армирующими каркасами полотняного переплетения на разрывное давление высота волны изгиба основной нити следует из геометрического соотношения Н.Г. Новикова [2, (29)] при $h_V = 0$:

$$h_o = d_O \eta_{OB} + d_V \eta_{VB}. \quad (13)$$

При этом коэффициент C_O определялся по формуле (11).

Расчет разрывных внутренних гидравлических давлений в ГПР и НПР $p^V_{разр.}$ и

$p^O_{разр.}$ по формулам (1)-(5) выполнялся на основе исходных данных производителей ГПР (ООО «Балтикфлекс», г. Санкт-Петербург, АО «Ивхимпром», г. Иваново) и найденных по результатам испытаний модулей продольной упругости полиуретана, а также данных производителя НПР (ПО «Берег»), других параметров рукавов, установленных по результатам исследования их тканых армирующих каркасов, и экспериментальных данных по усилиям разрыва нитей ПНР, представленных в работе [3].

Исходные данные для расчета разрывных внутренних гидравлических давлений в ГПР и НПР сведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Номинальный диаметр DN, мм	Материал волокон основной нити	Материал волокон уточной нити	Диаметр основной нити, мм	Диаметр уточной нити, мм	Геометрическая плотность по основе, мм	Геометрическая плотность по утку, мм	Толщина стенки, мм	Коэффициент вертикального смятия основной нити	Коэффициент вертикального смятия уточной нити	Коэффициент горизонтального смятия основной нити	Коэффициент горизонтального смятия уточной нити	Модуль упругости основной нити, ГПа	Модуль упругости уточной нити, ГПа	Модуль упругости полиуретана (резины), МПа	Деформация при разрыве уточной нити, %	Усилие при разрыве основной нити, Н	Усилие при разрыве уточной нити, Н
Гибкие плосковорачиваемые рукава																	
100	Полиэфир	Полиэфир	1,57	2,12	2,05	3,12	4,14	0,60	0,66	1,67	1,52	3,20	3,070	9,35	18,5	425	891,8
150	Полиэфир	Полиэфир	2,30	3,14	2,96	4,69	7,03	0,62	0,69	1,61	1,45	3,11	3,016	4,74	19,5	1745	3232
150	Полиэфир	Полиэфир	2,32	4,50	3,07	7,14	7,56	0,59	0,63	1,69	1,59	3,11	3,008	4,74	18,0	1745	6425
150	Полиэфир	Полиэфир	2,40	3,85	2,53	5,33	7,09	0,57	0,61	1,75	1,64	3,11	3,012	4,74	17,6	1890	5411
400	Полиэфир	Арамид	2,12	2,00	2,63	3,48	5,87	0,55	0,77	1,82	1,30	3,16	120,0	4,74	4,5	1477	2218
Напорные пожарные рукава																	
150	Лавсан	Лавсан	2,00	2,00	2,02	2,97	3,65	0,558	0,559	1,79	1,79	2,90	2,90	3,20	17,2	795	795
89	Лавсан	Лавсан	1,80	1,60	1,82	2,63	3,21	0,545	0,549	1,83	1,82	2,77	2,95	3,20	15,8	645	505
77	Лавсан	Лавсан	1,35	1,45	1,09	2,38	2,55	0,532	0,528	1,88	1,89	2,93	3,15	3,20	13,1	363	429
66	Лавсан	Лавсан	1,20	1,30	1,07	2,15	2,39	0,543	0,540	1,84	1,84	3,06	3,07	3,20	13,0	287	356
51	Лавсан	Лавсан	1,20	1,35	1,09	2,14	2,41	0,553	0,545	1,81	1,83	3,05	3,10	3,20	12,2	286	335

В табл. 2 представлены расчетные разрывные давления, найденные по формулам (1) и (5) при исходных данных табл. 1, и экспериментальные значения разрывных давлений ГПР и НПР, а также расхождение между ними в %.

Эксперименты по определению разрывных внутренних гидравлических давлений

ГПР указанных диаметров, проведенные в лабораториях по испытаниям ГПР ООО «Балтикфлекс» (г. Санкт-Петербург) и АО «Ивхимпром» (г. Иваново), показали, что разрушение этих изделий происходило от разрыва уточных нитей (рис. 2).

Т а б л и ц а 2

Номинальный диаметр DN, мм	Расчетное разрывное внутреннее гидравлическое давление в рукаве, обусловленное разрывом основных нитей, МПа	Расчетное разрывное внутреннее гидравлическое давление в рукаве, обусловленное разрывом уточных нитей, МПа	Экспериментальное разрывное внутреннее гидравлическое давление в рукаве, обусловленное разрывом уточных нитей, МПа	Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями разрывных давлений, обусловленных разрывом уточных нитей, %
Гибкие плосковорачиваемые рукава				
100	12,293	5,248	5,00	4,96
150	16,332	6,669	6,19	7,74
150	15,813	8,689	8,52	1,98
150	20,671	9,806	10,00	1,94
400	5,612	2,698	2,49	8,35
Напорные пожарные рукава				
150	10,625	2,770	2,60	6,53
89	16,334	3,421	3,20	6,91
77	17,655	3,825	4,20	8,93
66	16,345	4,014	4,30	6,65
51	21,149	4,936	5,20	5,08

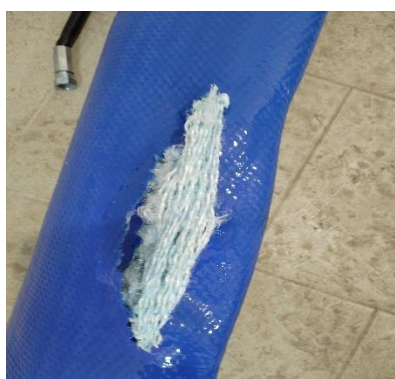


Рис. 2

Аналогичный результат, а именно то, что рукава разрушаются от разрыва уточных нитей, был установлен сотрудниками отдела сертификации и метрологического обеспечения Всероссийского научно-исследовательского института противопо-

жарной обороны МЧС РФ (г. Балашиха, Московская обл.). В специализированной лаборатории сотрудниками были проведены опыты в соответствии с ГОСТ Р 51049-2008 (Метод определения разрывного давления рукава) по разрыву НПР производства ПО «БЕРЕГ» диаметров с 51 мм по 150 мм с целью определения экспериментальных значений внутренних разрывных давлений данных рукавов при их сертификации.

Результаты испытаний всех видов рукавов подтверждают сделанный ранее вывод в [1], что в большинстве случаев $p^y_{разр.} < p^o_{разр.}$ и разрушение ГПР, ПНР обуславливается разрывом уточных нитей.

Следует отметить, что проверить степень совпадения экспериментальных и расчетных значений разрывных давлений в

ГПР, НПР, обусловленных разрывом основных нитей (зависимость (5)), не представляется возможным из-за разрушения рукавов от разрыва уточных нитей при более низких разрывных давлениях.

Для объективной оценки точности соответствия расчетных и экспериментальных данных по разрывным давлениям рассчитан коэффициент несоответствия Тэйла [4]. Для ГПР и НПР (табл. 2) этот коэффициент имеет значения соответственно 0,04 и 0,07. Чем ближе значение этого коэффициента к нулю, тем выше уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных. Но уже при значении коэффициента Тэйла в диапазоне от 0,1 до 0,15 уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных принято считать высоким.

ВЫВОДЫ

Низкие расчетные значения коэффициента несоответствия Тэйла для гибких плосковорачиваемых и напорных пожарных рукавов (соответственно 0,04 и 0,07) подтверждают высокий уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных по разрывным давлениям, на основании чего ранее полученная зависимость рекомендуется к использованию при расчете и проектировании этих технических изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов С.Г., Буланов Д.А., Додонов О.А. и др. Прочностной расчет гибких плосковорачива-

емых рукавов при действии внутреннего гидравлического давления // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 5. С. 231...239.

2. Степанов С.Г., Буланов Д.А., Додонов О.А. и др. Развитие теории, разработка метода расчета гибких плосковорачиваемых рукавов при действии внутреннего гидравлического давления // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. № 4. С. 234...245.

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

4. Пискунов Е.Ю. Модификация коэффициента Тэйла // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2012. № 5. С. 156...161.

REFERENCES

1. Stepanov S.G., Bulanov D.A., Dodonov O.A. etc. Strength calculation of flexible flat-folded hoses under internal hydraulic pressure // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. № 5. P. 231...239.

2. Stepanov S.G., Bulanov D.A., Dodonov O.A. etc. 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. №4. P. 234...245.

3. 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). Shymkent, 2018. 159 p.

4. Piskunov E.Yu. Modification of the Theil coefficient // Bulletin of the Irkutsk State University of Economics. 2012. No. 5. P. 156...161.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 13.05.24.