

Южно-Казахстанский государственный университет им. М.О.Ауэзова

УДК 677.077

На правах рукописи

**АРИПБАЕВА АКЕРКЕ ЕРКОСАЕВНА**

**Развитие теории, разработка методов расчета и проектирования тканых армирующих каркасов пожарных напорных рукавов**

6D073300 – Технология и проектирование текстильных материалов

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)

Научные консультанты:  
доктор технических наук,  
профессор, академик НАН РК  
Мырхалыков Ж.У.  
доктор технических наук, доцент  
Степанов С.Г.

Республика Казахстан  
Шымкент, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ</b>	4
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b>	5
<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	7
<b>1 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПОЖАРНЫМ НАПОРНЫМ РУКАВАМ, МЕХАНИКЕ НИТИ И СТРОЕНИЮ ТКАНИ. ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ РАБОТЫ</b>	13
1.1 Назначение, технические требования, конструкции пожарных напорных рукавов, анализ работ по их расчету	13
1.2 Анализ литературы по механике нити, теории строения ткани и их использование для прочностного расчета пожарного рукава при действии внутреннего гидравлического давления	22
1.3 Обоснование цели и задач работы	35
<b>2 РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДА РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ПОЖАРНЫХ НАПОРНЫХ РУКАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ</b>	39
2.1 Математическая модель, описывающая взаимодействие нитей в тканом армирующем каркасе пожарного напорного рукава	39
2.2 Упрощенная математическая модель, описывающая взаимодействие нитей в тканом армирующем каркасе пожарного напорного рукава	67
2.3 Решение упрощенной математической модели приближенными методами. Формула для расчета на прочность пожарного рукава при гидравлическом воздействии	68
<b>3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ, ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ПОЖАРНЫХ НАПОРНЫХ РУКАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ</b>	80
3.1 Определение исходных данных для расчёта на прочность пожарных рукавов при гидравлическом воздействии. Экспериментальное исследование зоны контакта нитей в тканом армирующем каркасе рукава	80
3.2 Прочностной расчет латексированных пожарных напорных рукавов при действии внутреннего гидравлического давления и подтверждение достоверности теоретических положений	91
<b>4 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАЗРЫВНОГО ВНУТРЕННЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫХ НАПОРНЫХ РУКАВОВ ОТ РЯДА ПАРАМЕТРОВ ИХ ТКАНОГО АРМИРУЮЩЕГО КАРКАСА</b>	95

4.1	Зависимость внутреннего разрывного давления в пожарном рукаве от геометрических плотностей по основе и утку его тканого армирующего каркаса	96
4.2	Зависимость внутреннего разрывного давления в пожарном рукаве от разрывного усилия уточных нитей и радиуса рукава	99
4.3	Зависимость внутреннего разрывного давления в пожарном рукаве от коэффициентов смятия нитей его тканого армирующего каркаса	100
4.4	Зависимость внутреннего разрывного давления в пожарном рукаве от диаметров нитей основы и утка его тканого армирующего каркаса	102
4.5	Зависимость внутреннего разрывного давления в пожарном рукаве от длин зон контакта между нитями в его тканом армирующем каркасе	104
<b>5</b>	<b>МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТКАНЫХ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСОВ ПОЖАРНЫХ НАПОРНЫХ РУКАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ</b>	<b>107</b>
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>118</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>121</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b>	<b>138</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b>	<b>140</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b>	<b>143</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г</b>	<b>145</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д</b>	<b>148</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е</b>	<b>154</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж</b>	<b>156</b>

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертационной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 51049-97. Техника пожарная. Рукава пожарные напорные. Общие технические требования. Методы испытания.

ГОСТ 472-75. Рукава пожарные напорные льняные. Общие технические условия.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей диссертационной работе использованы следующие определения, обозначения и сокращения:

Пожарные напорные рукава - плоско сворачиваемые гибкие трубопроводы, применяемые для подачи огнетушащей жидкости (воды и водных растворов пенообразователей) на расстояние под давлением;

Тканый армирующий каркас - основной элемент конструкции пожарного напорного рукава в виде тканой несущей цилиндрической оболочки, воспринимающей внутреннее давление жидкости для пожаротушения и предохраняющий рукав от разрыва;

Геометрическая плотность по основе – расстояние по горизонтали между центрами сечений соседних основных нитей в элементе ткани;

Геометрическая плотность по утку – расстояние по горизонтали между центрами сечений соседних уточных нитей в элементе ткани;

Коэффициенты вертикального смятия нитей – безразмерные величины, характеризующие степень смятия сечений нитей по вертикали;

Разрывное внутренне гидравлическое давление пожарного напорного рукава – величина внутреннего гидравлического давления жидкости, при котором пожарный рукав разрушается;

Разрывное усилие уточных нитей – усилие растяжения нити при котором она разрывается;

Линейная плотность нити - отношение массы отрезка нити в граммах к ее длине;

ПНР – пожарные напорные рукава;

$L_o, L_y$  – геометрические плотности ткани пожарного рукава по основе и утку;

$R$  – радиус поперечного сечения пожарного напорного рукава;

$\theta$  - угол между горизонталью и осью уточины в ее крайних сечениях;

$N_{o_1}$  - натяжение уточины в крайних сечениях;

$q_o, q_y, q_o^*, q_y^*, q_{ГУ}, q_{ГО}$  - распределенные нагрузки, действующие на нити утка и основы ( $q_{ГУ} = pL_y, q_{ГО} = pL_o, p$  - гидравлическое давление внутри пожарного рукава);

$N_y, N_o, Q_y, Q_o$  – текущие значения продольной и поперечной сил в сечениях уточной и основной нитей;

$l, s$  – текущие координаты изогнутых осей уточной и основной нитей;

$l_1, l_2, l_3, l_4, s_1, s_2, s_3, s_4$  - координаты, определяющие действие распределенных нагрузок в зонах контакта уточины и основы;

$\alpha, \varphi$  – текущее значение углов поворота плоскостей сечений уточной и основной нитей;

$v, z, y, x$  – координаты произвольной точки осевой линии уточной и основной нити в осях  $O_2y$  и  $O_2x$  ;

$A_y, A_o$  – изгибные жесткости уточной и основной нитей;  
 $q^y, q^o$  – функции, определяющие действие распределенных нагрузок, приложенных к отрезкам утка и основы;  
 $h^o, h^y$  – высоты волн изгиба отрезков соответственно основной и уточной нитей;  
 $d_o, d_y$  – диаметры поперечных сечений нитей основы и утка;  
 $\eta_{OB}, \eta_{yB}$  – коэффициенты вертикального смятия нитей;  
 $H(l - l_j), H(s - s_j)$  – функции Хевисайда, характеризующие действие распределенных нагрузок на отрезки нитей;  
 $\beta_o, \beta_y$  – безразмерные коэффициенты, характеризующие длины зон контакта между нитями в долях диаметров нитей.  
 $d_p$  – расчетный диаметр нити;  
 $T$  – линейная плотность нитей, текс;  
 $\gamma_m$  – объемная масса материала нити, мг/мм<sup>3</sup>;  
 мм – миллиметр;  
 Н – Ньютон;  
 МПа – мегапаскаль;  
 мг – миллиграмм.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** 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 надежности и работоспособности, так как от этого напрямую зависит положительный результат при тушении пожаров, и как следствие – спасенные жизни людей и имущество.

В настоящее время по причине отсутствия собственного производства Республика Казахстан вынуждена закупать ПНР у зарубежных производителей. Поскольку рукава относятся к дорогостоящему пожарному оборудованию, Казахстан несет существенные экономические затраты.

Потребность в ПНР Республики Казахстан ощутима, так как большая часть страны относится к зоне засушливого климата, а, следовательно, предрасположенной к возникновению пожаров.

Особенно актуальным является налаживание собственного производства новых высокотехнологичных ПНР на территории Республики Казахстан, что полностью отвечает постановлению Правительства Республики Казахстан от 31 декабря 2013 года № 1497 «Об утверждении Концепции индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015-2019 годы», усилению мер в направлении политики импортозамещения через создание новых производств министерства экономического развития РК, преследующих цели по увеличению казахстанского содержания закупок товаров и услуг на рынке, созданию новых рабочих мест.

Для создания собственного производства высокотехнологичных ПНР на территории Республики Казахстан помимо производственных площадей и оборудования крайне важным является развитие и углубление теории расчета и методов проектирования ПНР, которые, безусловно, будут востребованы при расчете и проектировании новых инновационных видов ПНР, а также для выявления причин разрывов рукавов при тушении пожара. Последнее согласуется с принятой стратегией «Казахстан-2050» в области новой политики развития инновационных исследований, а тема диссертационной работы соответствует программе научных исследований Южно-Казахстанского государственного университета им. М.О. Ауэзова.

Признанием актуальности, научной и практической значимости темы данной диссертационной работы является то, что ее продолжение и дальнейшее развитие в виде проекта AP05133582 «Разработка методики расчета и проектирования тканых армирующих каркасов пожарных напорных рукавов с целью создания новых высокотехнологичных образцов этих технических изделий» поддерживается и финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Таким образом, тема данной диссертационной работы по развитию, углублению теории прочностного расчета ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения и разработке научно обоснованных и достоверных методов их проектирования отвечает требованию актуальности.

**Степень изученности проблемы.** Первой работой, посвященной расчету на прочность ПНР при действии внутреннего гидравлического давления, является книга Н.А. Тарасова-Агалакова, где предложено использовать для расчета ПНР формулу для расчета на прочность труб при действии внутреннего гидравлического давления жидкости. Однако такой подход имеет целый ряд недостатков, что сказалось на точности расчетов.

Существенный вклад в разработку теории и методов расчета на прочность ПНР при гидравлическом воздействии внесен О.С. Степановым с соавторами, работы которых не лишены недостатков. Так, в опубликованных работах при исследовании взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ПНР вводится ряд допущений, которые на наш взгляд недостаточно обоснованы и не подтверждены экспериментами, что привело к заметному расхождению между расчетными и экспериментальными значениями разрывных давлений.

Поэтому разработка теории, новых, более точных методов расчета и проектирования тканых армирующих каркасов ПНР необходима.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Основной целью настоящей диссертационной работы является развитие, углубление теории прочностного расчета тканых армирующих каркасов ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения и разработка научно обоснованных и достоверных методов их проектирования.

Данная цель может быть достигнута при разработке положений, решении следующих задач, выносимых на защиту:

- получение обобщенной системы уравнений (математической модели), описывающей взаимодействие нитей в тканом армирующем каркасе ПНР, и вытекающей из нее, как частный случай, упрощенной математической модели строения ткани армирующего каркаса рукава; полученные математические модели должны быть разработаны на базе обоснованных допущений по отношению к нитям и структуре рукава, учитывать особенности взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ПНР, а именно экспериментально найденные величины коэффициентов вертикального смятия нитей, реальные длины зон контакта между нитями, реальные формы деформированных осей нитей и др.;

- получение относительно простых и удобных при использовании формул для прочностного расчета ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения;

- проведение комплекса экспериментальных исследований зон контакта между нитями в ПНР с применением современных измерительных средств и использованием методов статистики при обработке результатов для установления величин коэффициентов вертикального смятия нитей, длин зон



контакта между нитями в тканых армирующих каркасах ПНР разных диаметров;

- подтверждение достоверности теоретических положений и формул для прочностного расчета ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения путем сравнения теоретических результатов, полученных на основании разработанных теоретических положений и соотношений, с имеющимися экспериментальными данными;

- исследование влияния различных параметров тканого армирующего каркаса на прочность ПНР на основе полученных в данной диссертационной работе формул;

- разработка усовершенствованной, научно обоснованной и достоверной методики прочностного расчета и проектирования ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения, которая может быть востребована при проектировании и создании новых видов рукавов.

**Основные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

- системы уравнений (математические модели), описывающие взаимодействие нитей в тканом армирующем каркасе ПНР при действии внутреннего гидравлического давления, и полученные на их основе формулы для прочностного расчета ПНР, учитывающие особенности взаимодействия нитей в тканом армирующем каркасе ПНР, а именно экспериментально найденные величины коэффициентов вертикального смятия нитей, реальные длины зон контакта между нитями, реальные формы деформированных осей нитей и др.;

- результаты и методика экспериментальных исследований зон контакта между нитями в ПНР с применением современных измерительных средств и использованием методов статистики при обработке результатов для установления величин коэффициентов вертикального смятия нитей, длин зон контакта между нитями в тканых армирующих каркасах ПНР разных диаметров;

- подтверждение достоверности теоретических положений и формул для прочностного расчета ПНР;

- результаты исследования влияния различных параметров тканого армирующего каркаса ПНР на величину его разрывного давления на основе полученных в данной диссертационной работе формул;

- усовершенствованную, научно обоснованную и достоверную методику прочностного расчета и проектирования ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения, на основе которой был рассчитан и спроектирован тканый армирующий каркас ПНР из полиэфирных нитей, и на круглоткацком станке корейской фирмы «K YOUNG WON» произведен опытный образец тканого армирующего каркаса рукава.

**Объектами исследования являются** пожарный напорный рукав, тканый армирующий каркас, представляющий собой несущую цилиндрическую оболочку из ткани на основе полиэфирных нитей.

**Методы исследования.** Теоретические исследования в работе выполнены

с использованием основных положений и методов:

- высшей математики (теория дифференциальных уравнений, методы дифференциального и интегрального исчисления);

- текстильного материаловедения;

- теоретической механики, механики деформируемого твердого тела, нелинейной механики гибкой нити;

- теории строения однослойных тканей полотняного переплетения.

При проведении экспериментальных исследований зон контакта между нитями в ПНР использовалась высокоточная измерительная аппаратура - растровый электронный микроскоп JSM-6490LV, позволяющий исследовать микроструктуру и провести анализ поверхности ПНР. При обработке экспериментальных данных использовались методы статистики.

**Научная новизна** работы заключается в развитии, углублении теории, разработке нового, усовершенствованного метода прочностного расчета ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения. Разработана обобщенная система уравнений, описывающая взаимодействие нитей в тканом армирующем каркасе ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения, и на ее основе получена упрощенная математическая модель строения ткани армирующего каркаса рукава, которая в отличие от математических моделей других авторов учитывает такие параметры нитей в тканом армирующем каркасе ПНР, как фактические величины коэффициентов вертикального смятия нитей, реальные длины зон контакта между нитями, близкие к фактическим формы деформированных осей нитей и др. На основе данной теории получены новые формулы для прочностного расчета ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения, разработана методика расчета и проектирования ПНР, на основе которой определены разрывные давления в латексированных ПНР и исследовано влияние различных факторов на их прочность. Отличительной особенностью и достоинством полученной новой формулы и разработанной на ее основе методики расчета и проектирования ПНР является ее более существенная точность по сравнению с формулами других авторов.

Выполнен не имеющий аналогов в работах других авторов комплекс экспериментальных исследований зон контакта между нитями в ПНР с применением методов статистики для определения величин коэффициентов вертикального смятия нитей, длин зон контакта между нитями в тканых армирующих каркасах ПНР разных диаметров.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** Полученные в диссертационной работе новые формулы для прочностного расчета ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения, разработанная на их основе методика расчета и проектирования ПНР имеют практическую значимость, т.к. будут востребованы при расчете и проектировании новых видов ПНР, а также для выявления причин разрыва рукавов при тушении пожаров.

Результаты настоящей диссертационной работы получили положительную оценку и внедрены: в Ивановской пожарно-спасательной академии государственной противопожарной службы МЧС России (г. Иваново, Российская Федерация), где используется методика расчета и проектирования тканых армирующих каркасов ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения для оценки прочности и надежности пожарных рукавов в лаборатории механики, а также в учебном процессе при преподавании дисциплин кафедры механики, ремонта и деталей машин в составе учебно-методического комплекса «Пожаротушение»; на фабрике ТОО «UNIT-CO.KZ» (г. Шымкент), где на основе разработанной методики выполнен расчет и проектирование тканого армирующего каркаса ПНР из полиэфирных нитей диаметром 77 мм, по результатам которых на круглоткацком станке корейской фирмы «K YOUNG WON» произведен опытный образец тканого армирующего каркаса. Имеются акты внедрения (см. Приложения В, Г).

**Автор защищает:**

- теоретические положения, включая научный подход, систему допущений и вывод систем уравнений (математических моделей), описывающих взаимодействие нитей в тканом армирующем каркасе ПНР при действии внутреннего гидравлического давления;
- формулы для прочностного расчета ПНР;
- результаты и методику экспериментальных исследований зон контакта между нитями в ПНР;
- достоверность теоретических положений и формул для прочностного расчета ПНР;
- результаты исследования влияния различных параметров тканого армирующего каркаса ПНР на величину его разрывного давления;
- методику прочностного расчета и проектирования ПНР при внутреннем гидравлическом давлении жидкости для пожаротушения.

**Личный вклад автора.** Автором диссертации лично сформулирована идея, цель и задачи диссертационной работы, разработаны научные положения, получены математические модели и формулы для прочностного расчета ПНР, выполнен комплекс экспериментальных исследований зон контакта между нитями в тканых армирующих каркасах ПНР с применением современных измерительных средств и использованием методов статистики при обработке результатов, подтверждена достоверность теоретических положений и формул для прочностного расчета ПНР, исследовано влияние различных параметров тканого армирующего каркаса ПНР на величину его разрывного давления, разработан метод расчета и проектирования тканых армирующих каркасов ПНР, на основе которого выполнен расчет и проектирование тканого армирующего каркаса ПНР из полиэфирных нитей диаметром 77 мм. По результатам проектирования на круглоткацком станке корейской фирмы «K YOUNG WON» произведен опытный образец тканого армирующего каркаса рукава.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и получили положительную оценку:

- на международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения-13» (16-17 апреля 2015 г.) «Стратегический шаг на пути индустриально-инновационного и социально-экономического развития страны», г. Шымкент, ЮКГУ;

- на международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения-14» (15-16 апреля 2016 г.) "Инновационный потенциал науки и образования Казахстана в новой глобальной реальности», г. Шымкент, ЮКГУ;

- на III международной научно-технической конференции «Промышленная технология и инжиниринг», г. Шымкент, 2016;

- на XIX международном научно-техническом форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEX – 2016) г. Иваново, ИВГПУ;

- на VII Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов», г. Иваново, 2016;

- на VIII Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов», г. Иваново, 2017;

- на межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности» (Поиск – 2016) г. Иваново, ИВГПУ;

- на II межвузовской научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», Иваново, 2016;

- на Республиканской заочной научно-практической конференции «Наука и образование: поиск, обязанности, будущее», г. Тараз, 2016.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 21 научной публикации, в том числе, в 1-ой статье в журнале, входящем в базу Scopus, в 2-х статьях в журнале, входящем в международные базы данных RSCI Web of Science, в 2-х статьях в международном журнале, в 3-х статьях, рекомендованном МОН РК, в 9 статьях в сборниках материалов научно-технических конференций, в том числе 4-х международных. Подана заявка на выдачу патента на полезную модель «Напорный пожарный рукав», №2017/0308.2 от 17.05.2017г.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из содержания с указанием страниц разделов и подразделов, нормативных ссылок, определений, обозначений и сокращений, введения, пяти разделов с выводами, заключения, списка используемой литературы, приложения. Основное содержание диссертации изложено на 137 страницах машинописного текста. Диссертация включает 26 рисунков, 3 таблицы, список используемой литературы из 249 наименований. Приложения к диссертации насчитывают 22 страницы.