

На правах рукописи



Буланов Дмитрий Андреевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР
ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ ГИБКИХ РУКАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
ВЕЛИЧИНЫ ВНУТРЕННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и
легкой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: **Степанов Сергей Гаевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, г. Иваново

Официальные оппоненты: **Никифоров Александр Леонидович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры пожарной безопасности объектов защиты, ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», г. Иваново

Рудовский Павел Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории механизмов и машин, деталей машин и проектирования технологических машин, ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново

Защита диссертации состоится «17» сентября 2026 года в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.2.300.02 на базе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., д. 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»: <http://www.ivgpu.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 года

Ученый секретарь диссертационного совета
24.2.300.02, доктор технических наук, профессор



Е.Н. Никифорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Плоскосворачиваемые гибкие рукава (ПГР) широко применяются для транспортирования жидких сред в различных отраслях промышленности. Надежность и долговечность таких изделий в значительной степени определяются рациональностью их структурных параметров и способностью воспринимать внутренние гидростатические давления (ВГД). В настоящее время отечественные ПГР нередко уступают зарубежным аналогам по ряду эксплуатационных характеристик, что обуславливает необходимость совершенствования методов их проектирования.

Существующие подходы к расчету и формированию структуры рукавов недостаточно учитывают влияние внутреннего гидростатического давления на напряженно-деформированное состояние и эксплуатационные свойства изделий. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка методики проектирования рациональных структур ПГР с учетом условий их нагружения. Решение данной задачи позволит повысить надежность и долговечность рукавов, подобрать рациональные параметры их конструкции и снизить материалоемкость, что будет способствовать созданию востребованных отечественных изделий на рынке полимерных трубопроводов.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время публикации, посвященные расчету и проектированию структур ПГР при действии ВГД недостаточно подробно представлены в научной литературе. К публикациям, заложившим основы расчета и проектирования структуры ПГР, можно отнести труды Степанова С. Г., Бахарева Б. А.

Существенно большее количество публикаций (Степанова О.С., Арипбаевой А. Е., Моторина Л. В. и др.) посвящено расчету пожарных напорных рукавов (ПНР).

Методы расчета и проектирования, предложенные авторами перечисленных выше работ, хотя и имеют недостатки (отсутствие учета связующего – полиуретана, резины или латекса, увеличения геометрических плотностей ткани армирующей тканой оболочки (АТО) и радиуса рукава под действием ВГД, условия прочности ПГР по основным нитям), но позволяют рассчитать такой важный параметр, как разрывное давление уже на стадии проектирования структуры рукава.

В работах ряда авторов (Новикова С. Г., Абашкина М. В., Корнева В. А., Андреева В. М. и др.) предпринята попытка применить теорию оболочек из однородного материала к расчету ПГР. Однако плоскосворачиваемые гибкие рукава, относящиеся к композиционным материалам, имеют гетерогенную (неоднородную) структуру, которая под действием ВГД деформируется, и применение для их расчета теории оболочек из однородного материала вызывает сомнения.

Таким образом, анализ опубликованных работ показывает, что существующие методы расчета и проектирования ПГР в недостаточной степени учитывают особенности их поведения при действии ВГД. Это обуславливает необходимость дальнейшего развития научных подходов к проектированию рациональных структур плоскосворачиваемых гибких рукавов.

Целью исследования является снижение материалоемкости и себестоимости плоскосворачиваемых гибких рукавов путем выбора их рациональных структур на

основе использования разработанной методики расчета и проектирования, позволяющей прогнозировать разрывные давления с учетом особенностей взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке при действии внутреннего гидростатического давления.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработана расчетная и математическая модели взаимодействия нитей армирующей тканой оболочки;
- получены зависимости для определения разрывных давлений в рукавах;
- сформулированы условия прочности для недопущения разрыва рукавов;
- подтверждена достоверность разработанных теоретических положений;
- разработана методика расчета и проектирования рациональных структур плосковорачиваемых гибких рукавов при действии ВГД.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики, учитывающей влияние связующего (полиуретана), изменение геометрической плотности ткани армирующей оболочки по основе и утку, радиуса рукава при действии внутреннего гидростатического давления, которая позволяет определить рациональные структурные параметры плосковорачиваемых гибких рукавов с целью снижения материалоёмкости при сохранении их несущей способности.

При этом получены следующие научные результаты:

- разработана расчётная схема и получена обобщенная система уравнений, описывающая взаимодействие нитей в армирующей тканой оболочке плосковорачиваемых гибких рукавов с переплетением саржа 1/2;
- выведена зависимость, связывающая ВГД с нелинейным изгибом нитей и такими параметрами армирующей тканой оболочки, как средние силы растяжения в нитях и полиуретане, толщина стенки, геометрическая плотность ткани по нитям основы и утка, радиус рукава;
- сформулированы условия прочности для недопущения разрыва рукавов, получены зависимости для определения разрывных давлений, обусловленных разрывом как уточных, так и основных нитей;
- разработана методика расчета и проектирования рациональных структур плосковорачиваемых гибких рукавов при действии ВГД.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость исследования заключается в развитии и уточнении положений по расчёту и проектированию рациональных структур плосковорачиваемых гибких рукавов, работающих при высоких ВГД. Полученные результаты дополняют существующую теорию взаимодействия нитей в АТО, позволяют учитывать влияние связующего материала, геометрической плотности ткани и радиуса рукава, а также формируют основы для построения аналитических зависимостей между внутренним давлением, силами растяжения в нитях и параметрами конструкции рукавов. Это расширяет научное понимание механики армирующих оболочек и обосновывает разработку более эффективных методов расчёта и проектирования ПГР.

Практическая значимость заключается в применении полученной компьютерной программы на основе разработанной методики расчёта и проектирования плосковорачиваемых гибких рукавов, позволяющей на подготовительной стадии прогнозировать разрывные давления и выбирать

рациональные структурные параметры этих изделий. Использование предложенного подхода и программного обеспечения позволяет добиться снижения материалоемкости и себестоимости рукавов, повышая эффективность их промышленного производства.

Объектами исследования являются плоскосворачиваемый гибкий рукав, связующее в виде полиуретана, армирующая тканая оболочка.

Методология и методы исследования. Основу теоретического исследования составляют методы нелинейной механики гибкой нити и теории строения ткани, применённые для моделирования взаимодействия нитей армирующей оболочки ПГР. Достоверность исходных данных по разрывным усилиям нитей и модулю упругости полиуретана обеспечивалась экспериментальными испытаниями на разрыв и растяжение с использованием сертифицированного оборудования и стандартов ГОСТ, что гарантирует точность и воспроизводимость результатов.

Соответствие паспорту специальности. Проблематика, отраженная в исследовании, соответствует паспорту научной специальности 2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности (ИТЛП) по направлениям:

п.2 Проектирование структуры и прогнозирование показателей свойств и качества волокон, нитей, материалов и (ИТЛП);

п.10 Развитие теоретических основ проектирования и технологий переработки волокон, производства нитей, материалов и (ИТЛП).

Личный вклад автора. На всех этапах выполнения исследования автор под руководством научного руководителя принимал личное участие в постановке цели и формулировке основных задач диссертационной работы, проверке гипотез, в планировании и проведении экспериментальных исследований по определению модуля упругости полиуретана, усилий разрыва нитей, в подтверждении достоверности полученных зависимостей и интерпретации результатов в ходе экспериментов, в формулировании выводов, в подготовке публикаций и выступлениях на научных конференциях. Доля соискателя в опубликованных с соавторами работах по теме диссертации составляет от 30 до 80 %.

Положения, выносимые на защиту:

1) теоретические положения и обобщённая математическая модель деформационно-прочностного поведения плоскосворачиваемых гибких рукавов с полимерным связующим, армированных тканой оболочкой, при действии ВГД, учитывающие структурные параметры армирующей оболочки и особенности работы композиционного материала;

2) расчётные зависимости для определения разрывных гидростатических давлений и условия прочности для недопущения разрыва плоскосворачиваемых гибких рукавов, как по нитям основы, так и по нитям утка;

3) методика прочностного расчёта и проектирования рациональных структур плоскосворачиваемых гибких рукавов, основанная на учёте геометрических и физико-механических характеристик нитей основы и утка, параметров тканой армирующей оболочки и свойств полимерного связующего, обеспечивающая обоснованный, рациональный выбор конструктивно-технологических параметров изделий технического текстиля;

4) способы снижения материалоемкости плоскостворачиваемых гибких рукавов, основанные на рациональном подборе структурных параметров рукава при соблюдении требований к их прочности и надёжности при заданных условиях.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечены корректным использованием методов дифференциального и интегрального исчисления, теории упругости, сопротивления материалов, нелинейной механики гибкой нити и теории строения ткани. Теоретические положения и расчётные зависимости подтверждены экспериментальными данными по разрывным давлениям в ПГР, что свидетельствует о высокой точности и воспроизводимости полученных результатов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались автором на Межвузовских научных конференциях аспирантов и студентов Поиск - 2024, 2025; Международном научно-практическом форуме SMARTEX-2025; 77-ой Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов ЯГТУ, 2024 год; VII международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», ИПСА ГПС МЧС РФ г. Иваново, 2024 год; XXI международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения», п. Эльбрус КБР, 2025 год; Всероссийском семинаре по теории машин и механизмов Костромского филиала РАН РФ (институт машиноведения им. А.А. Благонравова); XII Международной ежегодной конференции ICITE-2025 «Промышленные технологии и инжиниринг» (Республика Казахстан г. Шымкент, Южно-Казахстанский университет).

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, 6 статей в научных журналах и сборниках научных трудов, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, а также 3 тезиса докладов в сборниках материалов научно-технических конференций различного уровня.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Основное содержание диссертации изложено на 151 страницах машинописного текста. Диссертация включает 29 рисунков, 3 таблицы, список используемой литературы из 203 наименований и 3 приложения на 3 листах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, направленной на разработку теоретических положений, научно обоснованной методики расчёта и проектирования рациональных структур ПГР при действии ВГД. Сформулирована и обоснована цель, определены основные вопросы, решение которых необходимо для ее достижения, научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе рассмотрены основные сведения, назначение, характеристики, преимущества, структура и области применения ПГР.

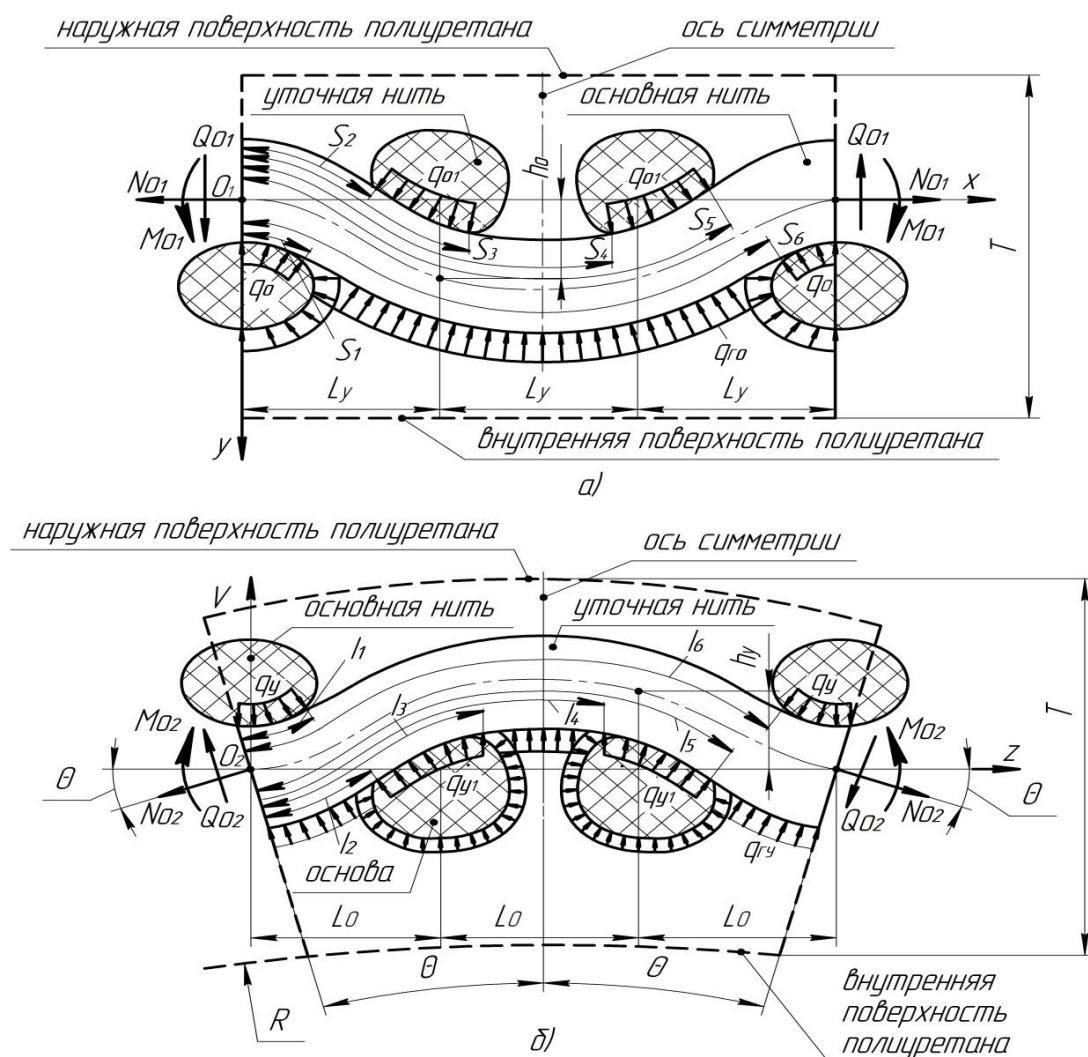
Проанализированы публикации по механике нити и теории строения ткани, а также прочностному расчету рукавов при действии ВГД. Анализ работ по прочностному расчету ПГР при действии ВГД показал, что данные публикации не отражают в полной мере их поведение, а теоретические положения и методы расчета не учитывают ряд важных особенностей работы и имеют следующие недостатки:

отсутствует возможность оценки влияния характеристик связующего на прочность рукава; не учитывается увеличение геометрических плотностей армирующей тканой оболочки по утку и основе и изменение радиуса рукава, обусловленные действием ВГД; получены условия прочности рукавов лишь для случая разрыва уточных нитей армирующей тканой оболочки, а разрушение рукава от разрыва основных нитей вообще не рассмотрено.

На сегодняшний день применение имеющихся теоретических положений для прочностного расчета ПГР нецелесообразно, так как рассмотрение рукава без учета этих особенностей его работы приводит к возрастанию неточности при проектировании их структуры.

В связи с вышеизложенным актуальной является разработка новых теоретических положений, методики расчёта и проектирования рациональных структур ПГР, при действии ВГД, лишённых указанных выше недостатков и позволяющих снизить материалоемкость и себестоимость данных изделий.

Во второй главе разработана расчетная схема равновесия отрезков нитей армирующей тканой оболочки ПГР под действием внешних и внутренних силовых факторов (рисунок 1, а, б). Данные отрезки нитей в АТО взаимно переплетены, взаимодействуют между собой и представляют периодически повторяющийся элемент.



На рисунке 1 использованы обозначения:

N_{O1} , N_{O2} , M_{O1} , M_{O2} , Q_{O1} , Q_{O2} - соответственно натяжения, изгибающие моменты, поперечные силы в краевых сечениях отрезков нитей;

q_O , q_Y , q_{O1} , q_{Y1} , q_{O2} , q_{Y2} - равномерно распределенные нагрузки на единицы длин отрезков нитей, которые принимаем направленными по нормальям к осям и контурам их поперечных сечений;

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;

T - толщина стенки ПГР;

R - внутренний радиус рукава;

O_1 , O_2 - начала систем координат vO_1z и yO_2x ;

h_O , h_Y - прогибы соответственно основы и утка в вертикальных плоскостях, проходящих через центры сечений нитей;

L_O , L_Y - геометрические плотности ткани АТО ПГР по основе и утку;

θ - угол наклона краевых сечений отрезков нитей: $\theta = \frac{1,5L_O}{R + 0,5T}$.

На основе расчетной схемы (рисунок 1) с использованием положений нелинейной теории строения ткани и механики гибких нитей была получена обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке ПГР с переплетением саржа 1/2.

$$A_Y \left\{ \frac{d^3 \alpha}{dl^3} - 0,5 \left[\left(\frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \Big|_{l=0} - \left(\frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \right] \frac{d\alpha}{dl} \right\} - N_{O1} \frac{d\alpha}{dl} + q^Y = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dz} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

$$A_O \left\{ \frac{d^3 \varphi}{ds^3} - 0,5 \left[\left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \Big|_{s=0} - \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right] \frac{d\varphi}{ds} \right\} - N_{O2} \frac{d\varphi}{ds} + q^O = 0, \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

$$\int_{l_2}^{l_3} q_{Y1} \cos \alpha dl = \int_{s_2}^{s_3} q_{O1} \cos \varphi ds, \quad (5)$$

$$\int_0^{l_1} q_Y \cos \alpha dl = \int_0^{s_1} q_O \cos \varphi ds, \quad (6)$$

$$-\int_0^{s_1} q_O \cos \varphi ds - \int_0^{s^*} q_{O2} \cos \varphi ds + \int_{s_2}^{s_3} q_{O1} \cos \varphi ds + \int_{s_4}^{s_5} q_{O1} \cos \varphi ds - \int_{s_6}^{s^*} q_O \cos \varphi ds = 0, \quad (7)$$

$$-\int_0^{l_1} q_Y \cos \alpha dl + \int_0^{l^*} q_{Y2} \cos \alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_{Y1} \cos \alpha dl + \int_{l_4}^{l_5} q_{Y1} \cos \alpha dl -$$

$$-\int_{l_6}^{l^*} q_Y \cos \alpha dl - 2N_{O2} \sin \theta = 0,$$

$$y(q_{O1}) + v(q_{Y1}) = 0,5[\eta_{OB}(q_O)d_O + \eta_{YB}(q_Y)d_Y] + 0,5[\eta_{OB}(q_{O1})d_O + \eta_{YB}(q_{Y1})d_Y], \quad (9)$$

$$q^y = q_y [1 - H(l - l_1) + H(l - l_6)] - q_{y1} [H(l - l_2) - H(l - l_3) + H(l - l_4) - H(l - l_5)] - q_{ly}, \quad (10)$$

$$q^o = q_o [1 - H(s - s_1) + H(s - s_6)] - q_{o1} [H(s - s_2) - H(s - s_3) + H(s - s_4) - H(s - s_5)] + q_{ro}, \quad (11)$$

где, 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 армирующей тканой оболочки;

y , x , v , z – координаты произвольной точки осевой линии основной и уточной нитей в осях yO_1x и vO_2z ;

A_o , A_y – изгибные жесткости основной и уточной нитей;

d_o , d_y – соответственно диаметры нитей основы и утка;

$\eta_{ob}(q_o)$, $\eta_{yb}(q_y)$, $\eta_{ob}(q_{o1})$, $\eta_{yb}(q_{y1})$ – коэффициенты вертикального смятия соответственно основной и уточной нитей в точках приложения распределенных нагрузок;

q^o , q^y – функции, определяющие действие распределенных нагрузок, приложенных к отрезкам основы и утка;

$H(l - l_j)$, $H(s - s_j)$ – функции Хевисайда, характеризующие действие распределенных нагрузок на отрезки нитей;

$y(q_{o1}) = h_o$, $v(q_{y1}) = h_y$ – прогибы соответственно основы и утка в вертикальных плоскостях, проходящих через центры сечений нитей.

Уравнения (1)-(4), характеризуют равновесие рассмотренных отрезков соответственно уточной и основной нитей в элементе АТО ПГР с переплетением саржа 1/2 и позволяют при отсутствии ВГД определить параметры АТО, такие как уработка нитей, высоты изгиба нитей и их отношение, формы осевых линий и длины нитей в ткани, сила давления между нитями, толщину и наполнение ткани волокнистым материалом и т. д. Выражения (5), (6) представляют собой равенство усилий при взаимодействии нитей в зонах контакта, (7), (8) – уравнения равенства нулю проекций усилий на оси y , v соответственно для нитей основы и утка. Уравнение (9) является основным геометрическим соотношением (условием совместности прогибов нитей) для АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 и связывает системы нитей утка и основы. Выражения (10), (11) – функции определяющие действия распределенных нагрузок на отрезки нитей.

Выполнив преобразования уравнений (7), (8) с учетом (5), (6), симметрии системы и малости угла θ , была получена зависимость (12), описывающая взаимодействие нитей в АТО при использовании низкомолекулярного связующего, влиянием которого на изгиб нитей АТО и прочность ПГР можно пренебречь:

$$0,5\mu_{yb} p L_y 3L_o + 0,5 p L_o 3L_y - 2N_{o2}\theta = 0, \quad (12)$$

где μ_{yb} – коэффициент, характеризующий какая часть нагрузки воспринимается уточной нитью;

p – интенсивность внутреннего гидростатического давления.

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 $3L_o$ и поперечным сечением L_y на T с

продольными силами под углом θ в краевых сечениях и нагруженного частью внутреннего давления, имеет вид:

$$\sum v = -2N_{YM}\theta + q_{\Gamma\Pi} 3L_O = 0, \quad (13)$$

где $q_{\Gamma\Pi} = 0,5(1 - \mu_{yB})pL$ – 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.

Сложили левую и правую части уравнений (12), (13) и проведя преобразования, получили зависимость внутреннего давления p в рукаве от средних сил натяжений в уточной нити АТО и полиуретане, геометрической плотности ткани по утку армирующей оболочки, радиуса и толщины стенки рукава:

$$p = \frac{N_{yB} + N_{YM}}{L_y(R + 0,5T)}, \quad (14)$$

где N_{yB} – среднее натяжение в нити утка.

Устанавливая связи между N_{yB} и N_{YM} , а также между средними натяжениями в нити основы N_{OB} и средней продольной силой N_{OM} в объеме полиуретана, приходящегося на отрезок основы, через анализ деформирования отрезка уточной (рисунок 2, а) и основной (рисунок 2, б) нитей со слоями полиуретана, и учитывая увеличение радиуса рукава и геометрической плотности по утку, обусловленные действием ВГД, были получены условия прочности и зависимости для расчета ПГР с АТО переплетения саржа 1/2 с полиуретановым связующим.

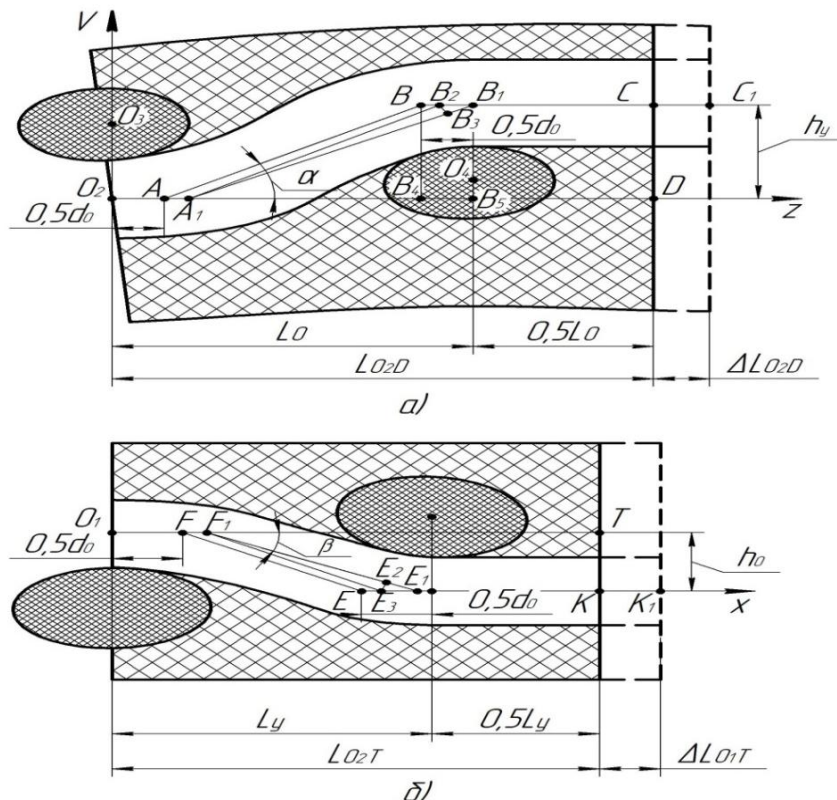


Рисунок 2 – Отрезки уточной (а) и основной (б) нитей со слоями полиуретана до и после деформирования

Условие прочности по уточным нитям армирующей тканой оболочки для недопущения разрыва ПГР от действия ВГД имеет вид:

$$N_{yB} = \frac{p \{ L_y E_{yB} A_{yB} [2(R + 0,5T)B + L_o R^2 (1 + C_o)] \}}{2BD - pL_y (1 + C_y) [2(R + 0,5T)B + pL_o R^2 (1 + C_o)]} \leq N_{разр.}^{yB}. \quad (15)$$

Условие прочности ПГР по основным нитям при действии внутреннего гидростатического давления:

$$N_{OB} = \frac{pL_o R^2 E_{OB} A_{OB}}{2(R + 0,5T) [E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_o)]} \leq N_{разр.}^{OB}, \quad (16)$$

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

E_{OB} , E_{yB} – соответственно модули упругости при растяжении основной и уточной нитей армирующей тканой оболочки рукава;

E_M – модули упругости полиуретана при растяжении;

A_{OB} , A_{yB} – соответственно площади поперечных сечений основной и уточной нитей АТО плоскосворачиваемого гибкого рукава, для которых из-за принятого допущения о форме их сечений в виде эллипса имеем:

$$A_{OB} = 0,25\pi \eta_{oГ} \eta_{oB} d_o^2; \quad A_{yB} = 0,25\pi \eta_{yГ} \eta_{yB} d_y^2; \quad (17)$$

$\eta_{oГ}$, η_{oB} – соответственно коэффициенты горизонтального и вертикального смятия поперечных сечений основной нити;

$\eta_{yГ}$, η_{yB} – соответственно коэффициенты горизонтального и вертикального смятия поперечных сечений уточной нити;

A_{oM} , A_{yM} – соответственно площади поперечных сечений полиуретана, приходящихся на отрезки нитей основы и утка:

$$A_{oM} = L_o T - 0,25\pi \eta_{oГ} \eta_{oB} d_o^2; \quad A_{yM} = L_y T - 0,25\pi \eta_{yГ} \eta_{yB} d_y^2; \quad (18)$$

где $N_{разр.}^{OB}$, $N_{разр.}^{yB}$ – усилия при разрыве соответственно основной и уточной нитей армирующей тканой оболочки плоскосворачиваемого гибкого рукава;

C_y , C_o – параметры, определяемые выражениями:

$$C_y = \frac{h_y^2}{L_o (L_o - d_o)}, \quad (19)$$

$$C_o = \frac{h_o^2}{L_y (L_y - d_y)}. \quad (20)$$

Разрывные давления, характеризующие способность плоскосворачиваемых гибких рукавов сопротивляться разрушению от ВГД, являются важными параметрами запаса прочности, регламентируемыми ГОСТ и техническими условиями, по которым осуществляется проектирование этих изделий.

На основе представленных выше теоретических положений получены зависимости для расчета двух видов разрывных давлений:

1) разрывное давление $p_{разр.}^y$, обусловленное разрывом уточных нитей АТО рукава, являющееся положительным корнем квадратного уравнения:

$$a(p_{разр.}^y)^2 + b(p_{разр.}^y) + c = 0, \quad (21)$$

решение, которого дает значение:

$$p_{разр.}^y = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (22)$$

где

$$a = \frac{L_O R^2 (1 + C_O) L_Y [1 + \varepsilon_{разр.}^y (1 + C_Y)] E_{yB} A_{yB}}{2 [E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O)]}, \quad (23)$$

$$b = L_Y [1 + \varepsilon_{разр.}^y (1 + C_Y)] (R + 0,5T) E_{yB} A_{yB}, \quad (24)$$

$$c = -N_{разр.}^{yB} [E_{yB} A_{yB} + E_M A_{yM} (1 + C_Y)], \quad (25)$$

$\varepsilon_{разр.}^y$ - деформация при разрыве уточной нити;

2) разрывное давление $p_{разр.}^O$, обусловленное разрывом основных нитей АТО рукава:

$$p_{разр.}^O = \frac{2(R + 0,5T) [E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O)] N_{разр.}^{OB}}{L_O R^2 E_{OB} A_{OB}}. \quad (26)$$

Таким образом, при проектировании рациональных структур ПГР необходимо при расчетах определять два вида разрывных давлений $p_{разр.}^y$ и $p_{разр.}^O$ и судить о разрушении ПГР при действии ВГД по наименьшему из них. Так, если $p_{разр.}^y < p_{разр.}^O$, то ПГР разрушится от разрыва уточных нитей. Такой случай, как правило, чаще встречается на практике. Для надежной и долговечной работы ПГР необходимо, чтобы рабочие внутренние давления в рукавах были существенно ниже разрывных. Однако такое соотношение может быть нарушено, когда при проектировании структуры ПГР, либо будут заложены уточные волокна недостаточной прочности, либо будет использована ткань АТО с большим значением геометрической плотности по утку L_Y , что снижает $p_{разр.}^y$. Расчеты показывают, что в большинстве случаев $p_{разр.}^y < p_{разр.}^O$ и ПГР разрушается от разрыва уточных нитей. Однако, если при проектировании ПГР будет заложено недостаточное число нитей основы, что приведет к увеличению геометрической плотности ткани АТО по основе L_O и снижению величины $p_{разр.}^O$, а также если в качестве основных выбраны нити с низкой разрывной нагрузкой, что в свою очередь вызовет снижение $p_{разр.}^O$, то возможен случай, когда $p_{разр.}^O < p_{разр.}^y$, и разрыв ПГР наступит из-за разрушения основных нитей. И в этом случае необходимо, чтобы рабочие внутренние давления в рукавах были существенно ниже разрывных.

Полученные условия прочности по уточным (15) и основным (16) нитям армирующей тканой оболочки для недопущения разрыва рукавов от действия ВГД, а также зависимости (22), (26) для расчета разрывных внутренних давлений, положены в основу методики расчета и проектирования рациональных структур ПГР.

В третьей главе изложены требования к плоскостворачиваемым гибким рукавам в соответствии с ГОСТ Р 58714-2019. Проведен анализ исходных данных для их прочностного расчета. Представлена методика определения модуля упругости полиуретана основанная на ГОСТ 9550-81 «Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе» и ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Методы испытаний на растяжение». Для рукава

DN100 мм по данной методике определили модуль упругости полиуретана, он равен 9,35 МПа, для рукавов остальных четырех диаметров значение этого параметра составило 4,74 МПа.

Достоверность предоставленных производителями значений по разрывным усилиям нитей АТО ПГР была подтверждена испытанием на разрыв тех же нитей на разрывной машине РМИ-250 в соответствии с ГОСТ 6611.2-73 «Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве».

В связи с тем, что при изготовлении ПГР могут быть использованы марки полиуретана с разными значениями модуля упругости (ГОСТ 34376.1-2017), исследовано влияние последнего параметра на разрывное давление, обусловленное разрушением уточных нитей, для ПГР номинальным диаметром DN 150 (рисунок 3).

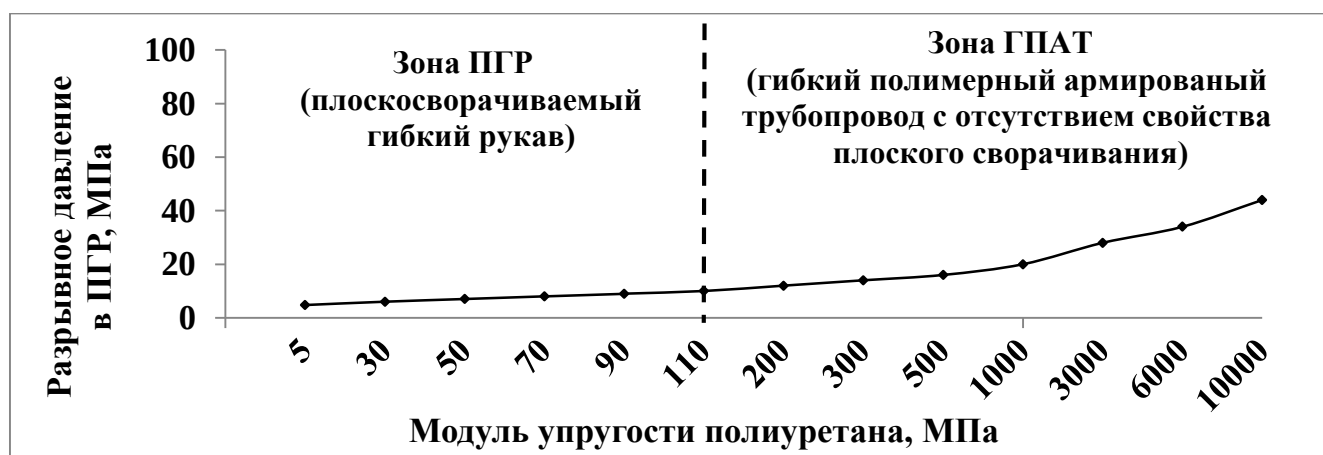


Рисунок 3—Зависимость разрывного давления от модуля упругости полиуретана

Анализ данной зависимости показал, что разрывное давление растет с увеличением модуля упругости полиуретана, причем тем значительнее, чем больше значение этого параметра. Так при использовании связующего с модулем упругости 4,75 МПа разрывное давление составило 8,75 МПа, а при значении 110 МПа оно возросло до 9,7 МПа. Таким образом, при большем модуле упругости связующего разрывное давление возросло на 10,86 %. Расчеты по зависимости (22) показали, что чем ниже прочность уточных нитей АТО, тем существеннее влияние полиуретана, так как в этом случае имеет место перераспределение усилий в пользу связующего.

В связи с тем, что ПГР в настоящее время используются в различных климатических условиях при температуре от -60 до 80°C, исследован вопрос зависимости модуля упругости полиуретана и разрывного давления в рукаве от температуры связующего. Анализ опубликованных работ о свойствах полиуретанов показал, что модуль упругости данного материала при повышении температуры снижается, а, следовательно, разрывное давление в ПГР, как показывают расчеты по зависимости (22), будет уменьшаться. Поэтому сделан вывод о том, что наиболее неблагоприятным случаем при расчете и проектировании рациональных структур ПГР будет предельно максимальная температура его эксплуатации.

Путем проведения комплекса испытаний на разрывной машине РМИ-250 подтверждены усилия разрыва нитей основы и утка, предоставленные производителями ПГР.

Достоверность разработанных расчетных зависимостей (22)-(26) подтверждена сопоставлением теоретических и экспериментальных данных по разрывным давлениям плоскостоворачиваемых гибких и близких к ним по структуре пожарных напорных рукавов (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнение расчетных и экспериментальных значений разрывных давлений

Номинальный диаметр DN, мм	Расчетное разрывное давление в рукаве, разрыв основы МПа	Расчетное разрывное давление в рукаве, разрыв утка, МПа	Экспериментальное разрывное давление в рукаве, разрыв утка, МПа	Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями разрывных давлений, %	Коэффициент несоответствия Тэйла
Плоскостоворачиваемые гибкие рукава					
100	5,02	12,293	5,00	0,40	0,04
150	6,33	16,332	6,19	2,21	
150	8,75	15,813	8,52	2,62	
150	9,88	20,671	10,00	1,21	
400	2,55	5,612	2,49	2,35	
Пожарные напорные рукава					
150	10,625	2,770	2,60	6,53	0,07
89	16,334	3,421	3,20	6,92	
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	5,07	

Низкие расчетные значения коэффициента несоответствия Тэйла для ПГР и ПНР (соответственно 0,04 и 0,07) подтверждают высокий уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных по разрывным давлениям. Полученные зависимости рекомендуются к использованию при расчете и проектировании рациональных структур этих технических изделий.

В четвертой главе на основе разработанных теоретических положений и зависимостей для прочностного расчета ПГР, анализа нормативной документации и методам испытаний рукавов разработана методика прочностного расчета и проектирования рациональных структур ПГР (рисунок 4), соответствующая нормативам ГОСТ Р 58714-2019.

Разработанная методика позволила выбрать рациональные параметры для рукава DN 150. Так увеличением геометрической плотности ткани АТО по нитям основы и утка (рисунок 5) удалось достичь снижения материалоёмкости рукава на 15% при значениях разрывных давлений $p_{разр}^y = 7,573$ МПа и $p_{разр}^o = 7,562$ МПа с обеспечением условий прочности ПГР.

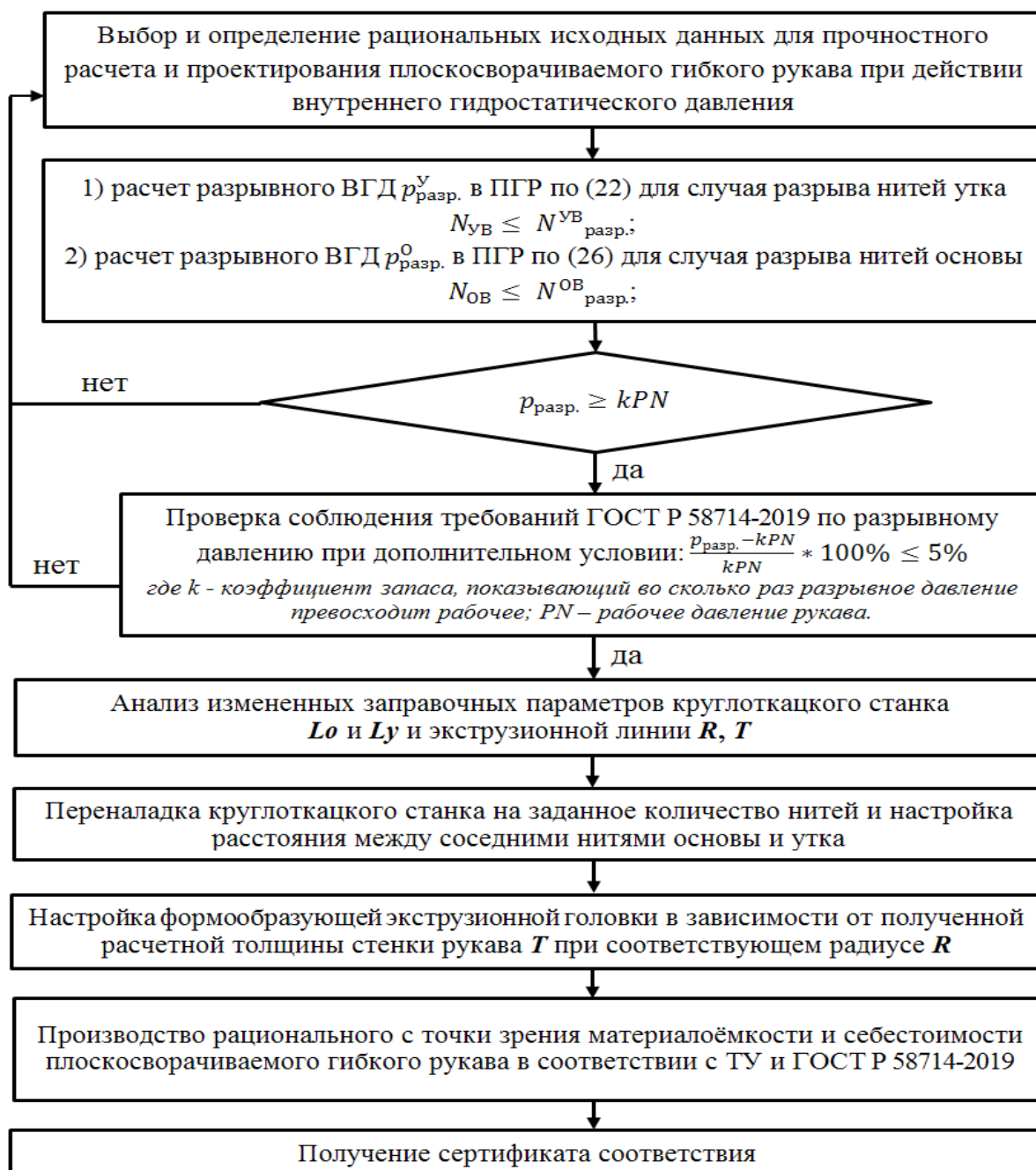


Рисунок 4-Методика расчета и проектирования рациональных структур ПГР

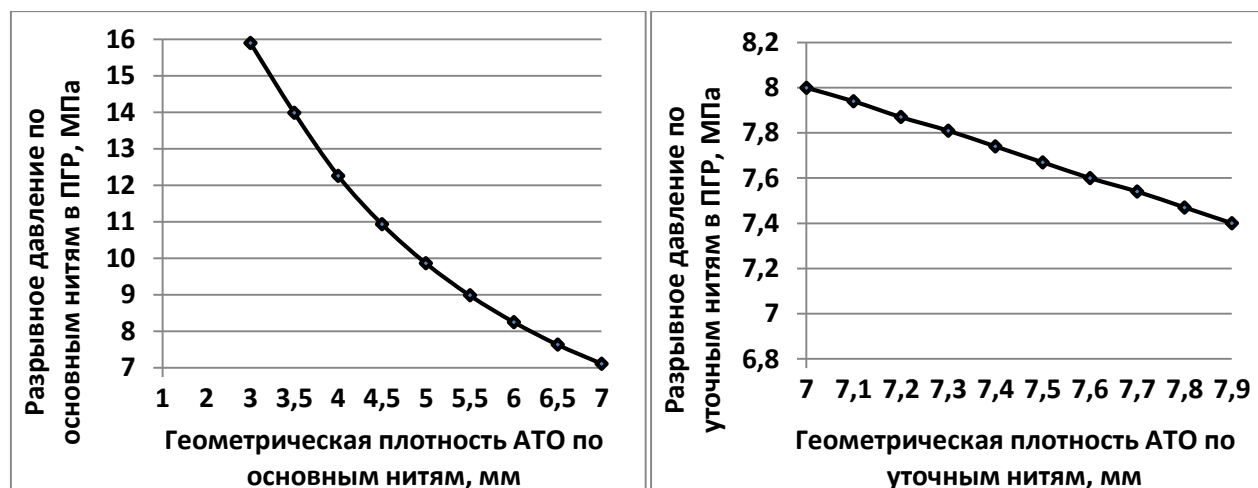


Рисунок 5–Зависимость разрывного давления ПГР от геометрической плотности ткани АТО по нитям основы и утка

С уменьшением линейных плотностей нитей основы и утка (рисунок 6) удалось уменьшить материалоемкость рукава на 17%, при разрывных давлениях $p_{разр}^y = 7,581$ МПа и $p_{разр}^o = 7,583$ МПа и соблюдению требований ПГР по прочности.

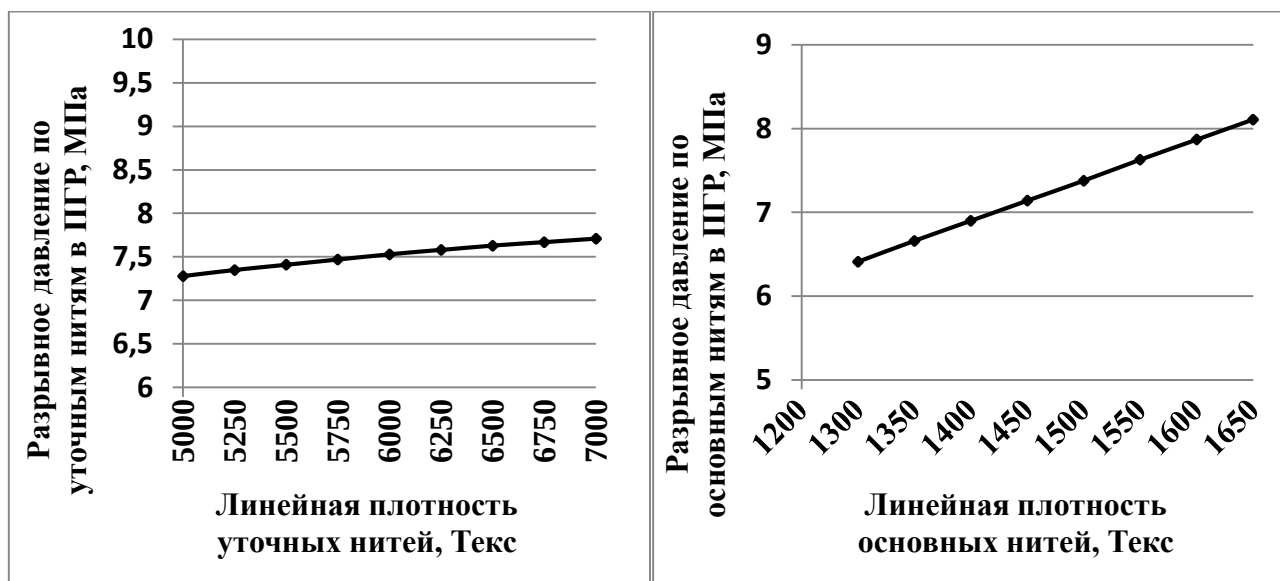


Рисунок 6–Зависимость разрывного давления ПГР от линейной плотности нитей

ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа существующих отечественных и зарубежных исследований по расчёту и проектированию структур плосковорачиваемых гибких рукавов установлено, что применение теоретических моделей, не учитывающих связующее, приводит к снижению расчётных разрывных давлений в рукавах по сравнению с фактическими и существенно увеличивает их погрешность.

2. С использованием нелинейной теории изгиба гибких нитей и принятой системы допущений разработана обобщённая математическая модель взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке плосковорачиваемого гибкого рукава с переплетением саржа 1/2, позволяющая описывать напряженно-деформированное состояние нитей основы и утка и определять основные геометрические и силовые параметры структуры ткани при действии внутреннего давления.

3. На основе разработанных расчётной и математической моделей впервые получена зависимость, связывающая внутреннее гидростатическое давление с силами растяжения в нитях армирующей тканой оболочки и связующем (полиуретане), геометрической плотностью ткани по утку и основе, радиусом и толщиной стенки рукава, при учёте изменения геометрических параметров АТО под действием внутреннего гидростатического давления.

4. Впервые сформулированы условия прочности плосковорачиваемых гибких рукавов как по уточным, так и по основным нитям армирующей тканой оболочки, что позволило обосновать необходимость определения двух видов разрывных давлений, обусловленных разрушением рукавов.

5. На основе полученных теоретических положений разработана научно обоснованная методика прочностного расчёта и проектирования рациональных структур плосковорачиваемых гибких рукавов, обеспечивающая соблюдение

условий прочности и позволяющая осуществлять выбор параметров рукавов при снижении материалоемкости и себестоимости этих технических изделий.

6. Достоверность разработанных расчетных зависимостей подтверждена высоким уровнем соответствия теоретических и экспериментальных данных по разрывным давлениям плоскостворачиваемых гибких и схожих с ними по структуре напорных пожарных рукавов по критерию Тэйла, равному 0,04 для ПГР и 0,07 для ПНР.

7. Установлено влияние полиуретана на разрывное давление в плоскостворачиваемых гибких рукавах. Так при расчете и проектировании рациональной структуры рукава DN 150 в случае пренебрежения учетом связующего значение разрывного давления снизилось на 9%, что привело к изначальному завышению материалоемкости и соответственно себестоимости изделия.

8. Применение разработанной методики при прочностном расчете и проектировании плоскостворачиваемого гибкого рукава DN 150 при рациональном подборе его структурных параметров позволило снизить материалоемкость на 17%, что подтверждает ее практическую эффективность при создании этих технических изделий.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в технологии проектирования и производства плоскостворачиваемых гибких рукавов, относящихся к изделиям технического текстиля, армированных тканой оболочкой с добавлением полимерного связующего. Разработанные теоретические положения, методика прочностного расчёта и программная реализация обеспечивают научно обоснованный выбор структурных и конструктивно-технологических параметров армирующих тканых оболочек и композиционного материала в целом на стадии проектирования изделий.

Полученные результаты целесообразно применять при разработке и совершенствовании технологии изготовления плоскостворачиваемых гибких рукавов, включая выбор вида переплетения армирующих тканей, линейной плотности нитей и геометрической плотности ткани оболочки, толщины и состава полимерного связующего с целью снижения материалоемкости и себестоимости.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка теоретических основ, методик расчёта и создание технологий производства многослойных плоскостворачиваемых гибких рукавов.

Дальнейшая разработка темы связана с уточнением математических моделей, описывающих деформационно-прочностное поведение тканых армирующих оболочек в составе композиционных материалов при действии внутреннего давления, а также с экспериментальной проверкой расчётных зависимостей для различных вариантов структуры тканей и связующих.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации

Статьи из перечня рецензируемых научных изданий

1. Степанов С. Г. Развитие теории, разработка метода расчета гибких плоскосворачиваемых рукавов при действии внутреннего гидравлического давления / С.Г. Степанов, Д.А. Буланов, О.А. Додонов и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2024. – № 4(412). – С. 234-245. – 0,75 п.л. / 0,45 п.л.

2. Степанов С. Г. Прочностной расчет гибких плоскосворачиваемых рукавов при действии внутреннего гидравлического давления / С. Г. Степанов, Д. А. Буланов, О. А. Додонов и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2024. – № 5(413). – С. 231-239. – 0,56 п.л. / 0,28 п.л.

3. Степанов С. Г. Проверка соответствия расчетных и экспериментальных значений разрывных гидравлических давлений в гибких плоскосворачиваемых рукавах / С. Г. Степанов, Д.А. Буланов, О.А. Додонов и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2025. – № 1(415). – С. 268-274. – 0,43 п.л. / 0,3 п.л.

Объекты интеллектуальной собственности

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026615706 Российская Федерация. Программа для расчета разрывных внутренних гидростатических давлений в плоскосворачиваемых гибких рукавах: № 2026614492: заявл. 24.02.2026: опубл. 27.02.2026 Кабанова Ю.С., Додонов О. А., Буланов Д. А., Степанов С. Г.; заявитель АО «ИВХИПРОМ».

Материалы научно-технических конференций различных уровней

1. Степанов, С. Г. Расчет и проектирование изделий из полимерных композиционных материалов на волокнистой основе / С. Г. Степанов, Д. А. Буланов // Первая конференция научно-образовательного консорциума "Иваново", Иваново, 16–21 мая 2022 года. – Иваново: Ивановский государственный университет, 2022. – С. 80-82. – 0,12 п.л. / 0,06 п.л.

2. Буланов Д. А. Гибкие плоскосворачиваемые композитные рукава, армированные синтетическими волокнами с полиуретановым связующим: назначение, характеристики, устройство / Д. А. Буланов, С. Г. Степанов / Семьдесят седьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием, Том 1, г. Ярославль 17-18 апреля 2024 г., ЯГТУ. – С. 197-200. – 0,25 п.л. / 0,18 п.л.

3. Буланов, Д. А. Гибкие плоскосворачиваемые композитные рукава, на основе синтетических волокон с полиуретановым связующим: устройство и применение / Д. А. Буланов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: Сборник материалов VII международной научно-практической конференции, Иваново, 17 октября 2024 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. – С. 39-42. – 0,25 п.л. / 0,12 п.л.

4. Буланов, Д. А. Применение мобильных трубопроводных систем на основе гибких плоскостворачиваемых рукавов для устранения чрезвычайных ситуаций и их последствий / Д. А. Буланов, С. Г. Степанов // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 11 апреля 2024 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. – С. 39-43. – 0,31 п.л. / 0,25 п.л.

5. Буланов, Д. А. Гибкие плоскостворачиваемые композитные рукава, армированные синтетическими волокнами с полиуретановым связующим: сферы применения, характеристики, устройство / Д. А. Буланов // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2024. – № 1. – С. 481-483. – 0,18 п.л.

6. Буланов Д. А. Развитие методов расчета и проектирования, гибких плоскостворачиваемых рукавов при действии гидростатического давления / Д. А. Буланов // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2025. – С. 362-364. – 0,18 п.л.

7. Расчет и проектирование гибких плоскостворачиваемых рукавов при действии внутреннего гидростатического давления / Д. А. Буланов, С. Г. Степанов, О. А. Додонов, Ю. С. Кабанова // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: Материалы XXI международной научно-практической конференции, Нальчик, 06–11 июля 2025 года. – Нальчик: Издательство «Принт Центр», 2025. – С. 52. – 0,06 п.л. / 0,024 п.л.

8. Буланов Д. А. Зависимости для прочностного расчета гибких плоскостворачиваемых рукавов при действии внутреннего давления жидкости / (SMARTEX) – 2025. – С. 19-24. – 0,37 п.л.

9. S. G. Stepanov, D. A. Bulanov, O. A. Dodonov and others. / Mobile flat-laying pipeline systems based on woven reinforcing frameworks and polyurethane binders: purpose, characteristics, structures, calculation and design methodology / Казахстан ICITE-2025. – С.166-174. – 0,56 п.л. / 0,25 п.л.

Подписано в печать 03.07.2026 года.
Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,00
Тираж 80 экз. Заказ №555.
Отпечатано в АО «Информатика»
153032, г. Иваново, ул. Ташкентская, 90.