

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный политехнический университет»

На правах рукописи

**Буланов Дмитрий Андреевич**



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

Специальность 2.6.16 Технология производства  
изделий текстильной и легкой промышленности

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

д-р техн. наук, доцент,  
Степанов Сергей Гаевич

Иваново – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫМ ГИБКИМ РУКАВАМ, МЕХАНИКЕ НИТИ И СТРОЕНИЮ ТКАНИ.....	13
1.1. Общие сведения о плоскостворачиваемых гибких рукавах.....	13
1.2. Назначение и области применения плоскостворачиваемых гибких рукавов .....	16
1.3. Характеристики и преимущества плоскостворачиваемых гибких рукавов .....	20
1.4. Анализ публикаций по теории структуры ткани, механике гибкой нити и их применение для расчета и проектирования плоскостворачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления .	24
1.5. Анализ работ о сферах применения, устройстве, конструкциях, технологиях изготовления и преимуществах плоскостворачиваемых гибких рукавов .....	40
1.6. Анализ работ по расчету плоскостворачиваемых гибких рукавов ...	45
1.7. Постановка целей и задач исследования .....	50
Выводы по главе.....	52
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ ГИБКИХ РУКАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	53
2.1. Система допущений для нитей армирующей тканой оболочки плоскостворачиваемых гибких рукавов и материала, из которого они состоят .....	53
2.2. Основное геометрическое соотношение (условие совместности прогибов) для армирующей тканой оболочки плоскостворачиваемых гибких рукавов на основе саржи $1/2$ .....	55

2.3. Обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке плоскосворачиваемых гибких рукавов на основе переплетения саржа 1/2.....	59
2.4. Получение зависимости внутренних гидростатических давлений от параметров плоскосворачиваемых гибких рукавов .....	74
2.5. Обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке полотняного переплетения .....	79
2.6. Зависимости для разрывных давлений и условия прочности плоскосворачиваемых гибких рукавов .....	82
Выводы по главе.....	94
<b>ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ ГИБКИХ РУКАВОВ, ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ.....</b>	<b>96</b>
3.1. Требования к плоскосворачиваемым гибким рукавам .....	96
в соответствии с ГОСТ Р 58714-2019.....	96
3.2. Объекты исследования и анализ исходных данных.....	98
для прочностного расчета плоскосворачиваемых гибких рукавов .....	98
3.3. Экспериментальное определение модуля упругости полиуретана ..	99
3.4 Зависимость модуля упругости полиуретана от его марок (групп) и температуры.....	101
3.5. Подтверждение достоверности исходных данных, предоставленных производителями.....	107
Выводы по главе.....	113
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ ГИБКИХ РУКАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>114</b>

4.1. Методика расчета и проектирования рациональных структур плоскостворачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления.....	114
4.2. Применение методики для расчета и проектирования плоскостворачиваемых гибких рукавов при действии ВГД при условии максимального снижения материалоемкости и обеспечении их прочности .....	118
Выводы по главе.....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	126
Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы .....	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Исходные данные .....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Программа для расчета.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ В - Акт внедрения.....	154

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Плоскосворачиваемые гибкие рукава (ПГР) широко применяются для транспортирования жидких сред в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве и системах пожаротушения. Надежность и долговечность таких изделий в значительной степени определяются рациональностью их структурных параметров и способностью воспринимать внутренние гидростатические нагрузки. 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 материалоёмкость, 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 внутреннего гидростатического давления (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 (не учитываются связующее, увеличение геометрических плотностей армирующей тканой оболочки (АТО) по нитям основы и утка, радиуса рукава под действием ВГД, получены условия прочности ПГР, обусловленные лишь разрывом уточных нитей), 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 плосковорачиваемые гибкие рукава, относящиеся к композиционным материалам, имеют гетерогенную (неоднородную) структуру, которая под действием внутреннего гидростатического давления 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 внутреннего гидростатического давления. Это обуславливает необходимость дальнейшего развития научных подходов к проектированию рациональных структур плосковорачиваемых гибких рукавов.

**Целью исследования** является снижение материалоемкости и себестоимости плосковорачиваемых 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 обозначенной 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 плоскосворачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления.

**Методология и методы исследования.** Основу теоретического исследования составляют методы нелинейной механики гибкой нити и теории строения ткани, применённые для моделирования взаимодействия нитей армирующей оболочки плоскосворачиваемых гибких рукавов. 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.

**Объектами исследования** являются плоскосворачиваемый гибкий рукав, связующее в виде полиуретана, армирующая тканая оболочка, представляющая собой бесшовный несущий каркас цилиндрической формы из ткани с переплетением саржа 1/2 на основе полиэфирных нитей.

**Научная новизна 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 плоскосворачиваемых гибких рукавов с целью снижения материалоемкости при сохранении их несущей способности.

При этом получены следующие научные результаты:

- разработана расчётная схема и получена обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке плоскосворачиваемых гибких рукавов с переплетением саржа 1/2;
- выведена зависимость, связывающая внутреннее гидростатическое давление с нелинейным изгибом нитей и такими параметрами армирующей тканой оболочки, как средние силы растяжения в нитях и полиуретане, толщина стенки, геометрическая плотность ткани, 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 плоскосворачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления.

**Теоретическая значимость работы.** Теоретическая значимость исследования заключается в развитии и уточнении положений по расчёту и проектированию рациональных структур плоскосворачиваемых гибких рукавов, работающих при высоких внутренних гидростатических давлениях. Полученные результаты дополняют существующую теорию взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке, 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 гибких рукавов.

**Практическая значимость** заключается в применении полученной компьютерной программы на основе разработанной методики расчёта и проектирования плоскосворачиваемых 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.

**Положения, выносимые на защиту:**

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

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

3) методика прочностного расчёта и проектирования рациональных структур плоскострачиваемых 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 плоскострачиваемых гибких рукавов, основанные на рациональном подборе структурных параметров рукава, с целью снижения материалоемкости при соблюдении требований к их прочности и надёжности при заданных условиях.

**Соответствие паспорту специальности.** Проблематика, отраженная в исследовании, соответствует паспорту научной специальности 2.6.16. «Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности» по направлениям:

п.2 Проектирование структуры и прогнозирование показателей свойств и качества волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности;

п.10 Развитие теоретических основ проектирования и технологий переработки волокон, производства нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности.

**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 и интерпретации полученных результатов в ходе экспериментов, в подтверждении достоверности полученных зависимостей, формулировании выводов. Автором лично или при его непосредственном участии проведена работа по публикации результатов исследований в виде статей в журналах и в сборниках материалов научно-технических конференций различного уровня.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы обеспечена 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 плоскостворачиваемых гибких рукавах, что свидетельствует о высокой точности и воспроизводимости полученных результатов.

**Апробация работы.**

Материалы диссертации докладывались и получили одобрение:

- на 77 Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием ЯГТУ, 2024 год;

- на XI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов»;

- на VII международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», ИПСА ГПС МЧС РФ (г. Иваново), 2024 год;

- на межвузовских научных конференциях аспирантов и студентов «Национальная молодежная научно-техническая конференция» ПОИСК-2024, ПОИСК-2025, ИВГПУ, г. Иваново;

- на XXI международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения», п. Эльбрус КБР, 2025 год;

- на международном научно-практическом форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоёмкие технологии и материалы (SMARTEX-2025)»;

- на всероссийском семинаре по теории машин и механизмов Костромского филиала РАН РФ (институт машиноведения им. А.А. Благонравова);

- на XII Международной ежегодной конференции ICITE–2025 «Промышленные технологии и инжиниринг» (Республика Казахстан г. Шымкент, Южно-Казахстанский университет).

**Публикации.** Основные материалы диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 3 статьи в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук», 5 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.

# ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫМ ГИБКИМ РУКАВАМ, МЕХАНИКЕ НИТИ И СТРОЕНИЮ ТКАНИ

## 1.1. Общие сведения о плоскосворачиваемых гибких рукавах

ПГР относятся к разновидностям трубопроводов, существенно отличающимся от традиционных шлангов цилиндрической формы из резины или других материалов. Их уникальность заключается в способности сохранять плоскую форму в нерабочем состоянии, поэтому в их названии присутствует термин «плоскосворачиваемые». Это свойство, на первый взгляд, кажется незначительным, но на практике оказывает существенное влияние на удобство использования и транспортировки. В отличие от других трубопроводов с круглым поперечным сечением, занимающих значительный объем при хранении и транспортировке, ПГР компактно складываются, что существенно экономит место. Экономия пространства – это не просто удобство, но и реальная оптимизация использования складских помещений и транспортных средств. Легкость – ещё одно важное преимущество ПГР. При равных показателях рабочего давления плоские рукава значительно легче традиционных (металлических) трубопроводов. Это существенно упрощает их перемещение, особенно в экстремальных условиях, например, при ликвидации ЧС, пожаров в труднодоступных местах. Пожарные, использующие пожарные напорные рукава (ПНР), близкие по своей структуре к ПГР, на собственном опыте оценили преимущества облегченного рукава. Меньшая масса означает меньшую физическую нагрузку на спасателей в критической ситуации. Это, в свою очередь, повышает эффективность работы и безопасность самих пожарных.

ПГР представляет собой трубопровод, состоящий из АТО и слоев полиуретана. Антистатический провод, расположенный в толще ПГР служит для снятия статического электричества (рисунок 1.1).

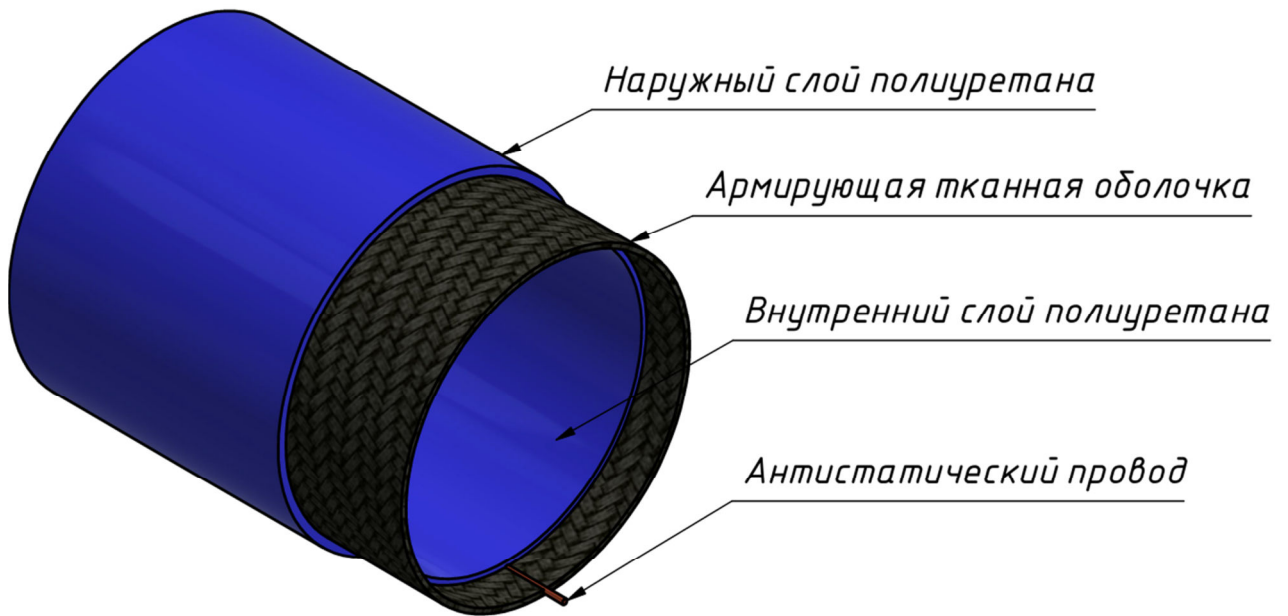


Рисунок 1.1 - Конструкция ПГР

В большинстве случаев несущие армирующие оболочки ПГР представляют собой однослойные ткани переплетения саржа 1/2. Таким образом, ПГР состоит из армирующей тканной оболочки, пространство между нитями которой заполнено полиуретаном. АТО обеспечивает высокое рабочее давление, а слои полиуретана герметичность, сопротивление коррозии, износостойкость, маслобензостойкость, устойчивость к химическому, физическому, бактериальному воздействию, эрозии, гидролизу и ультрафиолету. Кроме того, внутренний слой полиуретана обеспечивает гладкую внутреннюю поверхность, снижающую сопротивление потоку рабочей среды и препятствующую образованию отложений. Таким образом, каждый слой выполняет свою функцию, обеспечивая надежную работу рукава в самых сложных условиях.

Сферы применения ПГР обширны: сельское хозяйство (орошение, перекачка жидких удобрений), нефтедобыча, нефтепроводный транспорт, бункеровка судов (перекачка нефти и нефтепродуктов), дренаж рудников (перекачка пульпы, воды), предотвращение и ликвидация ЧС и многое

другое. В каждой из этих областей ПГР демонстрируют свои преимущества: легкость транспортировки и хранения, простота развертывания, высокая прочность и надежность. Современные ПГР – это не просто гибкие трубопроводы, а решение, повышающее эффективность и безопасность работы в различных отраслях промышленности. Их удобство, практичность и долговечность делают рукава данного типа незаменимым инструментом в самых разных сферах промышленности. Постоянное совершенствование технологий позволяет создавать ПГР с улучшенными характеристиками, расширяя их области применения и укрепляя позиции на рынке гибких трубопроводов.

На территории РФ на сегодняшний день одним из основных нормативных документов, регламентирующих конструкцию, рабочие параметры, технические и прочностные характеристики ПГР, является ГОСТ Р 58714-2019. Данный стандарт разработан обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта».

Согласно ГОСТ Р 58714-2019 ПГР представляет собой армирующую тканую оболочку с герметизирующим внутренним и внешним защитным слоями и антистатическим проводом в виде длинномерной трубы. Во время использования ПГР представляет собой цилиндрическую оболочку круглого, а в транспортном состоянии - плоского сечения. В соответствии с основными требованиями ГОСТ, указанного выше, ПГР должны обеспечивать герметичность и прочность при действии ВГД, обеспечивая при этом самый важный прочностной параметр, характеризующий рукав, а именно его разрывное давление.

## 1.2. Назначение и области применения плоскосворачиваемых гибких рукавов

ПГР, состоящие из бесшовных АТО на основе синтетических нитей с полиуретановой матрицей, в нефтегазовой промышленности незаменимы для создания временных трубопроводов, обеспечивая доставку нефти, воды и других технологических жидкостей в труднодоступные районы (рисунок 1.2), на участки с меняющимся ландшафтом или при проведении разведывательных работ.



Рисунок 1.2 - Транспортировка нефтепродуктов с помощью ПГР

Применение ПГР позволяет существенно сократить время и затраты на строительство традиционных магистралей, а также легко адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Современные ПГР с полиуретановым связующим способны выдерживать высокое давление и

температуру, используя материалы с высокой устойчивостью к коррозии и износу.

В горнодобывающей отрасли ПГР эффективно используются для транспортировки воды, пульпы, шлама и других материалов, обеспечивая непрерывный процесс добычи и переработки полезных ископаемых. Они позволяют оперативно перенаправлять потоки, адаптируясь к изменениям в горных рельефах (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Применение ПГР в горнодобывающей отрасли

Морская отрасль – ещё одна область, где ПГР демонстрируют высокую эффективность. Мобильные трубопроводные системы (МТС) на основе таких рукавов могут применяться для обеспечения непрерывной перекачки жидкостей на корабль (рисунок 1.4). Применение таких рукавов в морской отрасли позволяет производить перекачку не только с суши на судно, но и с одного судна на другое прямо на ходу. Это особенно актуально в удаленных районах или для судов, не имеющих возможности доступа к причальным сооружениям. Использование ПГР делает бункеровку более быстрой,

безопасной и экономически выгодной по сравнению с применением для этих целей стальных аналогов.

В сельском хозяйстве ПГР применяются для орошения земель, транспортировки удобрений и пестицидов (рисунок 1.5). Их мобильность позволяет эффективно использовать водные ресурсы и оптимизировать процессы обработки сельскохозяйственных угодий. Для этой отрасли особо важна прочность и устойчивость рукавов к воздействию агрессивных сред.



Рисунок 1.4 - Бункеровка судна по припайному льду



Рисунок 1.5 – ПГР при орошение полей

Военные и спасательные службы применяют ПГР для быстрого развертывания временной инфраструктуры в ЧС, включая поставку воды, топлива и других необходимых ресурсов в пострадавшие районы (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 - Применение ПГР для нужд МО и МЧС РФ

Лёгкость и компактность рукавов в сложенном состоянии делают их идеальными для транспортировки вертолётами, транспортерами, катерами или другим видом транспорта. Также ПГР обладают устойчивостью к повреждениям и способностью работать в экстремальных условиях.

В авиационной и ракетно-космической отрасли ПГР рассматриваются как перспективное решение для транспортировки жидкого топлива и окислителей при обслуживании техники.

Указанными сферами применение мобильных трубопроводов на основе ПГР не исчерпывается.

### **1.3. Характеристики и преимущества плоскостворачиваемых гибких рукавов**

ПГР, используемые в различных отраслях промышленности для транспортировки жидкотекучих сред, представляют собой современное решение для создания гибких, мобильных и надежных трубопроводов и МТС на их основе. На сегодняшний день выпускаются ПГР с диаметром  $D_y$  от 50 до 400 мм, что обеспечивает широкий диапазон применения – от небольших локальных систем до масштабных промышленных трубопроводов. Рабочее внутреннее давление таких рукавов варьируется от 10 до 63 бар, что позволяет использовать их для перекачки сред с различным давлением, включая высоконапорные системы.

ПГР применяются в диапазоне от  $-60$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . Это делает их пригодными для эксплуатации в экстремальных климатических условиях, от арктических регионов до жарких пустынь. Длина одной секции трубопровода может достигать 200 метров, что значительно ускоряет монтаж и снижает количество межсекционных соединений, повышая надежность всей системы в целом. Применение длинных секций также уменьшает вероятность утечек и снижает затраты на установку.

ПГР изготавливаются из износостойких антистатических материалов. Антистатические свойства обеспечиваются специальным проводом, электрическое сопротивление которого не превышает 0,5 Ом/м. Это критически важно для безопасной транспортировки легковоспламеняющихся или взрывоопасных сред, предотвращая накопление статического электричества и возникновение искр.

Основные технико-экономические показатели, конкурентные преимущества МТС на основе ПГР:

- допускается применение в районах с повышенной сейсмоактивностью; в грунтах пlyingунах, включая сыпучие породы; в лесной

местности и на территориях с труднодоступными природными формами поверхности (рисунок 1.7);

- используют при пересечении естественных водных преград и болот без применения пригрузов (рисунок 1.8);

- применяют в сложных метеорологических условиях, в морской воде, а также при воздействии ультрафиолета;

- обладают высокой эластичностью;

- устойчивы к перетиранию, повторяющимся сгибам и раздиру;



Рисунок 1.7 - ПГР на местности со сложным рельефом



Рисунок 1.8 – Пересечение водной преграды ПГР

- не подвержены внутренней и внешней коррозии, накоплению отложений и хладноломкости;
- устойчивы к воздействию нефтепродуктов, жиров, кислот, щелочей;
- имеют компактные размеры при транспортировке и хранении (рисунок 1.9);



Рисунок 1.9 - ППР во время транспортировки

- обладают относительно малым удельным весом, а остатки транспортируемого продукта автоматически удаляются при свертывании;
- не требуют высокой квалификации обслуживающего персонала, специального ухода и консервации;
- заменяют собой около 10 параллельно проложенных линий, состоящих из стальных труб диаметром 150 мм при диаметре ППР 400мм (рисунок 1.10);
- достигают 200 метров в длину, что значительно снижает количество соединений и тем самым уменьшает риск протечек продукта.

Еще одним важным преимуществом перед металлическими трубопроводами у мобильных систем развертывания, состоящих из ППР становится быстрота их прокладки одной бригадой. В этом случае организация трубопровода может быть обеспечена со скоростью 10 и более

километров в час, когда как металлическая линия чаще всего ограничена расстоянием до 5 километров в день.



Рисунок 1.10 – Транспортировка ПГР диаметром 400 мм

Описанные преимущества МТС, состоящих из ПГР, стали причиной быстрого роста их производства в мире в последние годы.

В технологии изготовления ПГР применяется метод экструзии. Расплавленный до 200°С полиуретан, продавливают через АТО при этом процессе заполняется расстояние между нитями и тем самым получается внутренний и наружный защитные слои. Сама АТО изготавливается на круглоткацких станках и имеет бесшовную трубчатую конструкцию.

Современное производство ПГР достаточно материалоемко и требует больших затрат на синтетические нити и полиуретан.

Если будут выбраны неверные заправочные параметры для круглоткацкого станка, то в итоге получится продукт, который не отвечает требованиям заказчика, технических условий или ГОСТ. В этом случае большой отрезок АТО ПГР спишется в брак. Поэтому на данном этапе цена ошибки при создании ПГР велика и существенно возрастает, если при изготовлении АТО используются дорогостоящие арамидные волокна.

Во избежание ошибок проектирования и перерасхода материалов становится необходимым решение первой фундаментальной проблемы - разработка научно обоснованной достоверной методики расчета и рационального проектирования ПГР.

#### **1.4. Анализ публикаций по теории структуры ткани, механике гибкой нити и их применение для расчета и проектирования плоскостворачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления**

Как уже было показано выше, важным элементом конструкции плоскостворачиваемых гибких рукавов является их бесшовная АТО из высокопрочных полиэфирных нитей, в значительной степени определяющая прочностные свойства ПГР при действии ВДГ. Фундаментальное исследование взаимодействия нитей в АТО ПГР невозможно выполнить без использования положений теории строения однослойных тканей и основы механики нити. Этим и обуславливается необходимость изучения и анализа публикаций в этих областях, на основе чего ниже будут определены подходы и направления решения проблемы разработки научно обоснованной методики расчёта и проектирования рациональных структур ПГР.

В настоящее время механика идеально гибких нитей, обладающих нулевой жесткостью при кручении и изгибе, является темой, которая получила наиболее полное изучение и освещение в существенном количестве научных трудов и публикаций.

Авторы работ [1-5] описывают в своих трудах фундаментальные принципы и понятия механики идеально гибких нитей, а также их эффективное применение при решении различных инженерных задач.

В реальности, из-за присутствия изгибов и скручиваний нити, последние обладают ненулевой жесткостью. Этот факт влияет на точность расчетов во многих ситуациях в текстильной отрасли. Применение теории

идеально гибких нитей без учета этой особенности может привести к результатам, которые либо недостаточно точны, либо вовсе не отражают действительности.

Полухин В.П., Рагоза И.В., Мигушов И.И., Каган В.М. и др. в работах [6–9] показали, что модель абсолютно гибкой нити не может быть применена в таких операциях текстильной промышленности, где основную роль играет крутильная и изгибная жесткость нитей.

Васильченко В.Н., Щербаков В.П., и др. в публикациях [10-13] отмечают, что в процессе производства трикотажных и ткацких переплетений нити подвергаются значительным деформациям. Как отмечал Степанов С.Г. в работе [13], это явление заметно как в однослойных, так и в многослойных тканях, особенно после их снятия с ткацких станков. Степанов Г.В. и др. в работе [14] отмечают, что особенно выражены деформации нитей в изделиях с повышенной плотностью переплетения.

В подобных случаях, применение модели идеальной нити недопустимо в качестве базы. Вместо этого, следует обратиться к модели гибкой нити на изгиб, как это продемонстрировано в исследованиях Степанова С.Г. с соавторами [12], [13].

В работе [15] детально описаны основы нелинейной механики нити и ткани с учетом их кручения, изгиба и растяжения. Исследование включает расчеты деформации нити и ткани и определение других их показателей.

Решение задач по механике нитей, может быть получено только с учетом модели гибкой нити. В данном контексте и в дальнейшем будем подразумевать под гибкой нитью модель, в которой принимается ненулевая жесткость на растяжение, изгиб и кручение.

После первоначальных открытий в области теории гибких нитей, знания в этой дисциплине были значительно расширены благодаря работам [16-20]. Их исследования привнесли новые понятия и подходы, углубив понимание механики гибких стержней и нитей.

Авторы научных публикаций [6, 8, 9] и работ [21-29], рассматривают аспекты контактного взаимодействия между абсолютно жестким цилиндром и упругой на изгиб нитью, приводя усовершенствованную формулу Эйлера. Это усовершенствование учитывает не только жесткость нити, но и размеры ее поперечного сечения, а также ряд дополнительных параметров.

В исследовании [30] Светлицкий В.А. с соавторами привели ключевые положения теории взаимодействия стержней (нитей) с внутренними потоками жидкости, так же ими были отмечены основные положения статики стержней, методики получения уравнений равновесия, способы численного интегрирования уравнений равновесия.

Положения и методы механики абсолютно гибких нитей описали авторы в публикациях [31-35]. Упор был сделан на рассмотрение нити как в динамике, так и в статике.

В работе [36] Джумабаевым Г.Х. с соавторами предложен алгоритм определения деформируемого состояния нитей. Авторы рассматривают нить с учетом вязкоупругих свойств ее материала. В ходе анализа теоретических результатов работы можно сказать, что учет вязкоупругих свойств материала нити приводит к улучшению качества и прочности пряжи.

Множество публикаций различных исследователей было представлено по теорию строения тканей.

Основы научного изучения структуры ткани были заложены Новиковым Н.Г. в исследовании [37]. Автор выявил ключевые факторы, которые влияют на строение ткани и определил, что взаимное расположение основных и уточных нитей зависит от плотности ткани, вида переплетения и других параметров. Новиков Н.Г. впервые получил основное геометрическое свойство для тканей полотняного переплетения - сумма высот волн изгиба основных и уточных нитей равна сумме их диаметров. Также автор описал влияние гибкости, прочности и других свойств нитей на порядок фазы строения.

В работе [38] Ефремов Е.Д. с соавторами представили методологию для вычисления натяжений нитей, необходимых для создания тканей с определёнными фазовыми структурами. Была разработана математическая формула, которая определяет связь между натяжением уточных и основных нитей и структурными характеристиками ткани.

В исследовании [39], проведённом Керимовым С.Г. с соавторами, был проанализирован механизм вариации высоты волн, образуемых изгибом основных и уточных нитей, влияние которого определяется последовательностью фаз в структуре ткани. Авторы исследования указывают на присутствующие неточности в теории фазового строения ткани, первоначально предложенной Н.Г. Новиковым. Исследователи предложили концепцию введения элементов нулевого порядка в структурное учение о фазах ткани. В результате исследования были разработаны формулы, которые позволяют точно определить высоты изгибных волн для основных и дополнительных нитей, а также классифицировать фазы структурирования ткани. Представленная модель предусматривает возможность присутствия любого нечетного количества фазовых порядков.

В работе [40] Смирновым В.И. структурированы итоги исследований, даны аналитический и графический методы расчета высот полотна и порядка фазы структуры ткани. Установлены зависимости между структурными элементами ткани, а также предложена теория и алгоритм расчёта плотности ткани, определена область её существования. Однако в данном исследовании автор допускает некоторые неточности: не принимает во внимание смятие нитей, что существенно влияет на плотность и механические свойства ткани; утверждает, что интервал между центрами соседних нитей равен сумме их диаметров, что не всегда верно.

В работе [41] Оников Э.А. и соавторы разработали алгоритм расчёта параметров строения тканей полотняного переплетения. Их алгоритм опирается на механико-геометрический подход. Также авторы приводят примеры расчётов для тканей полотняного переплетения. Их метод будет

практически ценен лишь для тканей, имеющих малую или среднюю плотности, но для тканей с высокой плотностью нитей применяться, он не может.

В исследовании [42] Сурнина Н.Ф. изучает методы проектирования однослойных и многослойных тканей. Автор рассматривает вопросы структуры ткани, описывает факторы, определяющие её строение. Сурниной Н.Ф. также приведен алгоритм заправочного расчёта по основным параметрам, рассчитанным при проектировании.

Дамянов Г.Б., Бачев Ц.З., Сурнина Н.Ф. в работе [43] описывают строение ткани и современные методы ее проектирования. Изучены вопросы строения ткани и определяющие его параметры (размеры нитей, их тип и форму и т.д.). Рассмотрены методы проектирования тканей по заданным параметрам.

Автор в исследовании [44] рассматривает ключевые аспекты дизайна и структуры ткани. В центре анализа находятся методы переплетения нитей, применяемые при производстве текстильной продукции. В процессе исследования выявлены ключевые параметры, определяющие структуру и функциональные свойства тканей. Описаны способы анализа тканевых образцов и алгоритмы выполнения их технических расчетов.

В своем научном труде [45-46] Уразов Н.Х. подробно анализирует архитектуру, методы анализа ткани и алгоритмы выполнения технического расчета. Особое внимание уделено введению коэффициента структуры ткани, что позволяет точно учесть положение нитей в ее структуре.

В работе [47] проведен анализ эффективности энергетического метода по сравнению с альтернативными подходами в исследовании морфологии тканей. Отмечается, что в некоторых контекстах эти подходы показывают сопоставимую точность и достоверность результатов.

Склянников В.П. расширил границы понимания в области структуры текстильных изделий. В серии своих исследований [48-51] он детально проанализировал изменения структурных параметров тканей в различных

условиях работы ткацких станков. Автор предложил новые теоретические модели и экспериментальные методики для изучения строения тканей с разнообразными переплетениями. Также он доказал, что строение тканей напрямую связано с настройками и характеристиками оборудования для ткачества.

В исследовании [52] Мигушовым И.И. установлена зависимость плотности ткани по уточным нитям от изгибной жёсткости нитей основы. Автор выразил данную зависимость в виде аналитической формулы. Также был разработан метод прогнозирования напряжённо-деформированного состояния системы нитей с учётом адекватного закона нагружения. Такой принцип позволил оценить многие параметры уже на этапе проектирования тканей.

Ерохин Ю.Ф и соавторы в работе [53] выявили корреляцию между техническими характеристиками настройки ткацкого оборудования и параметрами структуры ткани.

Подход к производству высокоплотных тканей, предложенный Юхиным С.С. с соавторами, подробно освещен в публикациях [54-56]. Авторы сформулировали эффективную модель прогнозирования рациональных условий для создания материалов высокой плотности, основываясь на принципах вязкоупругости и устойчивости к воздействию нагрузок, и применяя различные законы их приложения.

Исследователи в работах [57-60] провели анализ натяжения нитей в традиционных видах переплетений тканей. Также было рассмотрено влияние натяжения нитей на их изгиб и структурные особенности ткани.

Степанов Г.В. внес большой вклад в разработку методов исследования и расчета параметров структуры тканей [61-65]. Автором, благодаря принципам механики гибких нитей в нелинейной постановке, получена обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в ткани. Компьютерное моделирование показало, что деформация нитей в тканях с полотняным переплетением формирует волнообразную структуру, похожую

на синусоиду. Степанов Г.В. предложил формулу, позволяющую инженерам легко рассчитывать параметры строения низко- и среднеплотных тканей, где изгиб нитей минимален. Им установлена зависимость степени натяжения нитей от особенностей конструкции ткани, разработан способ вычисления уработки нитей, базирующийся на рядах Фурье. Степанов Г.В. изучил проблему заполнения тканей волоконным сырьем, провел расчеты и спроектировал технические ткани для производства термопластичных композиционных материалов, разработав технологию их выпуска.

В работе [66] Карева Т.Ю. рассматривает влияние работы механизмов ткацкого станка на натяжение нитей основы. Также автором выведена формула для определения общего натяжения нитей основы при формировании элемента ткани с переменным направлением осей в процессе ткачества.

В работах [67-73] авторы исследовали строение тканей с переменным направлением осевых линий основных нитей в процессе производства, влияние заправочных параметров ткацкого оборудования и жесткостных характеристик нитей на параметры строения ткани. В ходе работ авторами была разработана методика прогнозирования строения тканей, сформированных разными способами, а также разработан алгоритм расчёта полученных параметров.

Благодаря своим научным трудам [74-80] Николаев С.Д. вместе с соавторами значительно продвинулись в изучении устройства однослойных тканей, разработке способов расчета их характеристик, предсказании свойств и создании методик их производства. Они создали специальные программы, позволяющие анализировать состояние натяжения и деформации нитей непосредственно перед началом процесса ткачества.

В публикациях [81-90] выполнено исследование строения тканей и определены длины, а также высоты волн изгиба нитей основы и утка, формы осевых линий нитей в элементах ткани и уработка в зависимости от основных факторов строения ткани.

В статье [91] Степановым О.С. с соавторами получено обоснование основного геометрического соотношения профессора Н.Г. Новикова. Авторы подчеркивают, что данное соотношение может быть применимо даже для тканей с небольшим узором. В работе также приведены формулы для расчета высот деформации нитей и пример их применения.

В исследовании [92] Евсюкова Е.В. анализирует процесс разработки углеродных текстильных материалов, используя нити с разнообразными линейными плотностями, основываясь на специфических требованиях, включая параметры, такие как толщина, поверхностная плотность и предел прочности нитей на разрыв. Эти углеродные ткани предназначаются для дальнейшего использования в качестве наполнителя при создании композиционных материалов. Автором работы было рассмотрено влияние различных техник переплетения на характеристики получаемых углеродных тканей.

В работе [93] рассмотрено строение тканого полотна, изготовленного из высококомодульных нитей. Авторами была получена обобщенная система уравнений, описывающая строение технической ткани, содержащей комплексные высококомодульные базальтовые нити и стеклонити. В ходе работы также были определены высоты волн изгиба базальтовых нитей в ткани с учётом их жесткостных характеристик на изгиб.

В исследовании [94] Поляковой Л.П. с соавторами оценено влияние переплетений в тканях на разрывную нагрузку и прочностные характеристики однослойных изделий. Получен вывод, что разрывное удлинение и другие факторы в большей степени зависят от линейной плотности и состава ткани, чем от коэффициента переплетения.

Работа [95] посвящена разработке оптического метода для анализа структуры текстильных материалов с использованием современных информационных технологий. Вычисление параметров строения тканей при рассмотрении микросрезов вдоль основных и уточных нитей автор представил в виде программы.

Гречухин А.П. в своей работе [96] предлагает использовать кусочно-непрерывные функции для описания формы нитей в ткани. Он представил формулы для создания и построения профиля нити.

В работе [97] Керимовым С.Г. при различном соотношении диаметров нитей основы и утка была определена зависимость пофазного изменения величин основных параметров структуры тканей.

В исследовании [98] Гречухиным А.П. с соавторами был представлен новый подход к моделированию трехмерной структуры нити в ткани с полотняным переплетением. В исследовании [99] те же ученые описывают методику для выявления контуров профиля нитей в тканевом материале, отличающемся неравномерностью распределения нитей.

В научной работе [100] авторы детально описывают методики проектирования цифровых профилей нитей основы и утка для создания монослоя ремизной ткани, применяя вычислительную технику.

Исследование [101] акцентируется на разработке легких текстильных конструкций, используя полотняное и атласное переплетения, созданные с использованием нитей из полиамида и параарамида. Авторами доказана возможность создания легких сепарационных тканей с применением модифицированного ткацкого станка.

В работе [102], опираясь на нелинейную теорию изгиба жестких нитей, выполнено теоретическое исследование для определения параметров осевой линии деформации нитей в однослойной ткани.

В исследованиях Степанова С.Г. [13], [103] достигнут прогресс в изучении структуры тканей, благодаря применению положений нелинейной механики гибких нитей. Автором разработана обобщенная нелинейная теория строения однослойных тканей главных переплетений, на основе которой рассчитаны параметры строения и спроектированы техническая ткань из стеклонитей и капроновых нитей для производства термопластичных композиционных материалов, высокопрочная техническая ткань из сверхвысокомодульных нитей для армирования пластмасс и др.

В научной работе [104] Гречухин А.П. разрабатывает обобщенную систему уравнений для прогнозирования характеристик ткани из углеродных волокон, основываясь на нелинейной теории изгиба гибких упругих стержней, разработанной Поповым Е.П.. Автор демонстрирует эффективность своей модели на примере углеродной ткани низкой плотности, с небольшими амплитудами волн изгиба волокон, где влияние нелинейности оказывается незначительным.

Однако для более точной оценки нелинейной модели, следовало бы проводить исследования на образцах с высокой плотностью и значительными изгибами волокон, поскольку именно в таких случаях нелинейные эффекты становятся существенными. Автор также принимает допущение о точечном контакте между поперечными волокнами утка и основы, их взаимодействие он моделирует как действие сосредоточенной силы, что оправдано для материалов низкой плотности с минимальной площадью контакта волокон. Для высокоплотных материалов, где площадь контакта заметно увеличивается, подобное приближение может вызвать ошибки в расчетах, так как корректнее было бы рассматривать распределенное воздействие нагрузок в зоне контакта.

Анализ существующих научных трудов, посвященных теории строения тканей различных авторов, выявили несколько перспективных теоретических подходов которые могут быть не просто взяты за основу, но также развиты и адаптированы для применения их при разработке теоретических основ расчета ПГР.

В этом контексте полезными окажутся положения нелинейной теории строения тканей главных переплетений, разработанные Степановым С.Г. [13]. Однако нужно учитывать, что положения этой теории и обобщенной системы уравнений, требуют дополнения и усовершенствования при их применении для расчетов на прочность ПГР при действии ВГД, поскольку они были созданы для тканей с плоской геометрией и при отсутствии ВГД. Кроме того, цилиндрическая форма АТО ПГР приводит к дополнительному

изгибу нитей утка, расположенных по периметру рукава. Эти аспекты также должны быть учтены. Поэтому разработка методики расчета и проектирования ПГР требует более глубокого анализа взаимодействия нитей в АТО ПГР с учетом действия ВГД, дополнительного изгиба нитей и других факторов, влияющих на прочность и деформацию конструкции. В этом случае необходимо усовершенствовать имеющиеся положения работы [13], уделив особое внимание учету влияния ВГД и изгиба нитей. Этот подход используется автором работы [105], который на основе теоретических положений работы [13] предпринял попытки создания теории расчета и проектирования пожарных напорных рукавов (ПНР), близких по своей структуре к ПГР. Однако необходимо учитывать, что в этих работах не полностью учтены все влияющие факторы, что требует дальнейшего исследования и уточнения существующих моделей.

Необходимо провести экспериментальные исследования для верификации разработанных теоретических моделей и уточнения параметров, влияющих на прочность и долговечность ПГР. Только комплексный подход, объединяющий теоретические исследования, численные моделирования и экспериментальные данные, позволит создать надежную и точную теорию расчета и проектирования ПГР.

В научной работе Карева Т.Ю. с соавторами [106] фокусируется на строении и перспективах развития текстильных композитов, изготовленных на основе тканей. Эти работы посвящены изучению свойств тканей и их потенциала для применения в качестве армирующего материала в композиционных конструкциях. При этом рассмотрена возможность применения различных типов переплетений и высокомодульных волокон. Исследования касаются как структуры тканей, так и ее свойств, важных для создания композитов с заданными характеристиками. В другом исследовании [107] автор анализирует ткани с различным строением (ортогональным и неортогональным), предлагая их в качестве основы для создания композиционных материалов (КМ). Автор также исследует особенности

структуры этих тканей и рассматривает возможность использования высокопрочных волокон для производства композитов.

В статье [108] получена зависимость для прочностного расчета ПНР от действия внутреннего гидравлического давления.

В работе [109] экспериментально получены исходные данные и проведена оценка точности разрывных давлений ПНР по ранее найденной зависимости. Эта зависимость принимает во внимание такие факторы, как длины зон контакта между нитями, найденные коэффициенты их вертикального смятия и др. Такой подход, включающий в себя поиск исходных данных, дает более точные результаты расчета разрывных давлений ПНР по сравнению с формулами, полученными другими авторами ранее.

Сафонов П.Е. с соавторами в работе [110] экспериментально изучают масштабный эффект прочности комплексных арамидных нитей и некоторых видов пряжи со специальными свойствами. По заявлению авторов полученные данные будут служить для повышения точности оценки напряженности процессов переработки нитей и пряжи.

В работе [111] Щербаков В.П. и соавторы рассматривают деформирование ткани при двухосном нагружении. Авторами установлена связь напряжений и деформаций уточной и основной нитей с внешней нагрузкой в ткани. Также в ходе работы вычислена прочность ткани с учетом механических и геометрических свойств нитей.

В исследовании [112] авторами описывается влияние коэффициентов вертикального смятия нитей, коэффициентов, характеризующих длины зон контакта между нитями на величину разрывного давления в ПНР. Авторы утверждают, что учет данных параметров приведет к более точному определению разрывных давлений в ПНР. Также в данной статье авторами приводится методика экспериментальных исследований зон контакта между нитями в АТО ПНР.

В работе [113] представлена методика расчета упругих модулей композиционных материалов. Авторы используют понятие механической жесткости. Пироговым Д.А. с соавторами рассматривается геометрическая модель КМ на основе объемной тканой структуры с учетом геометрических характеристик нитей основы и утка. Приводится пример нахождения модуля Юнга в одном из направлений ячейки периодичности КМ.

В публикации [114] отражена связь эффективных упругих характеристик композиционного материала и технологии 3D-ткачества. В ходе работы выполнены расчет и моделирование упругих характеристик КМ различных фаз строения и структуры объемной ткани.

В работе [115] Николаев С.Д. описывает алгоритм прогнозирования процесса ткачества с учетом свойств применяемых нитей и технологии изготовления тканей. Описанный автором метод позволяет уже на стадии проектирования ткани определить условия работоспособности уточных и основных нитей, а также рассчитать рациональные параметры процесса изготовления ткани.

Статья Киселева М.В. с соавторами [116] представляет собой подробное экспериментальное исследование, которое посвящено изучению механических свойств отдельных углеродных нитей, входящих в состав композиционных материалов. Ключевым аспектом исследования является зависимость этих свойств от угла ориентации нити относительно направления действия внешней силы. Эксперимент проводился при трёх вариациях нагружений: растяжении, сжатии и сдвиге, что позволило получить максимально полную картину поведения углеродных нитей в условиях напряженно-деформированного состояния композита. Полученные данные важны при создании точных моделей поведения композиционных материалов в рамках вычислительной механики (CAE). В рамках исследования Киселевым М.В. с соавторами были определены критерии прочности углеродных нитей в композите. Эти критерии напрямую связаны с углом между осью нити и направлением действия внешней силы, что

согласуется с принципами феноменологической теории прочности. Для определения механических характеристик отдельных нитей внутри композита была разработана специальная методика, основанная на теории совместной деформации. Экспериментальная часть исследования включала в себя проведение многочисленных испытаний конкретного типа углеродного препрега. Для обеспечения высокой достоверности полученных результатов была проведена масштабная статистическая обработка экспериментальных данных, которая позволила установить высокую достоверность полученных зависимостей. В результате исследования были получены аппроксимирующие зависимости, описывающие изменение механических характеристик углеродных нитей в зависимости от угла между осью нити и направлением действия внешней силы.

Статья Румянцева Е.В. с соавторами [117] представляет собой анализ стремительно развивающегося рынка полимерных композиционных материалов (ПКМ). Центральной темой исследования является замена традиционных металлических конструкций на композиционные аналоги – тенденция, определяющая современное развитие отраслей промышленности. Авторы статьи не просто констатируют этот факт, а подробно разбирают причины такого перехода, уделяют внимание уникальным свойствам композитов, создаваемых на основе различных армирующих элементов: текстильных тканей, нитей и волокон. Анализ рыночной ситуации, представленный в статье, демонстрирует устойчивый и значительный рост производства композиционных материалов во всем мире, с особым подчеркиванием динамичного развития китайского сектора данной индустрии. Этот быстрый рост обусловлен не только расширением сфер применения композитов, но и постоянным развитием технологий их производства, снижением себестоимости и повышением качества конечной продукции. Авторы работы приводят убедительные примеры применения композиционных материалов в самых передовых и технологически сложных областях промышленности: авиастроении, космической отрасли и оборонной

промышленности. В этих секторах высокие требования к прочностным характеристикам, легкости и коррозионной стойкости делают композиционные материалы незаменимыми. Использование композитов позволяет создавать более легкие и прочные летательные аппараты, космические модули и военную технику, что существенно улучшает их характеристики и эксплуатационные свойства. Помимо анализа существующих применений авторы анализируют современные методы проектирования и моделирования композиционных материалов. Особое внимание уделено моделированию этапов изготовления композитов с детальным описанием применения современных текстильных технологий. Это подчёркивает важность взаимодействия между текстильной индустрией и сферой производства композиционных материалов, демонстрируя роль инноваций в текстильной отрасли для развития новейших высокотехнологичных КМ.

В ходе работы [118] авторы определили оптимальный технологический метод для изготовления шланга повышенной износостойкости, который будет использоваться в перистальтическом насосе. В ходе исследования был проведен детальный анализ существующих на данный момент методов изготовления шлангов, что позволило выявить их преимущества и недостатки. На основе полученных данных разработаны рекомендации по созданию шлангов, которые обладают улучшенными характеристиками износостойкости. Эти рекомендации направлены на то, чтобы продлить срок службы перистальтического насосного агрегата, снизить частоту замены шлангов и, как следствие, уменьшить затраты на обслуживание и эксплуатацию оборудования. Важно отметить, что применение шлангов, изготовленных по новым технологиям, может значительно повысить надежность работы насосов и обеспечить стабильность их функционирования в условиях различных производственных процессов.

Предложенная авторами в работе [119] методика позволяет прогнозировать наиболее рациональные параметры и значения натяжений в ткани, с целью получения качественных материалов.

Целью работы [120] стала разработка технологии производства шланга, обеспечивающей значительное увеличение его рабочего ресурса. В рамках этого исследования авторами был разработан метод расчёта ресурса шланга, учитывающий все вышеперечисленные факторы износа: циклические нагрузки, абразивное истирание, химическую деградацию материала. Этот метод позволил оценить эффективность различных подходов к повышению долговечности. Проведенный авторами анализ существующих способов увеличения ресурса показал, что конструктивные изменения, например, использование более износостойких материалов или модификация геометрии шланга, ведут к существенному удорожанию и усложнению технологического процесса производства. Поэтому исследователи сосредоточились на оптимизации существующей технологии изготовления. Предложенная инновационная технология принципиально отличается от традиционных методов формирования многослойного шланга.

Жолдасовой А.Б. с соавторами в работе [121] на основе теории фазового строения ткани рассмотрены девять фаз строения ткани. Авторами была разработана модель фазового строения ткани. В каждой фазе были определены параметры ткани с помощью геометрического метода. Также определены: высота волны утка, угол трения между нитями.

В статье [122] Рудовского П.Н. и Гречухина А.П. представлен анализ условий эксплуатации средств индивидуальной бронезащиты и текстильных элементов, входящих в их состав. Авторами отмечается, что при скреплении нескольких слоев арамидных тканей нитями (в многослойные пакеты) в направлении, перпендикулярном направлениям основы и утка можно создавать структуры, которые будут воспринимать большие нагрузки от поражающих элементов.

### **1.5. Анализ работ о сферах применения, устройстве, конструкциях, технологиях изготовления и преимуществах плоскосворачиваемых гибких рукавов**

В статье [123] Абашкин М.В. и Михайловская А.П. представили подробный анализ методов изготовления плоскосворачиваемых рукавов, состоящих из термопластичных слоев и тканой оболочки. На основании обзора разработана соответствующая классификация. Рассмотрены и детально охарактеризованы все существующие способы производства гибких плоскосворачиваемых рукавов, изучены их технологические аспекты. Итогом исследования стало выявление сильных и слабых сторон каждого метода, а также определение оптимального варианта при соблюдении условия высокого качества конечного продукта.

В работе [124] авторы акцентируют внимание на значимости исследований, направленных на создание и усовершенствование современных трубопроводных систем, используемых в сложных климатических условиях, таких как северные и арктические регионы. Полученные результаты могут привести к улучшению технических параметров транспортировки дизельного топлива, что, в свою очередь, может способствовать увеличению экономической эффективности и повышению безопасности эксплуатации этих систем.

В исследовании [125] Ларионова С.В. и Х. Ху, основанном на заводских испытаниях плоскосворачиваемого трубопровода, была получена интервальная оценка интенсивности отказов. Эта оценка служит основой для разработки метода расчёта коэффициента оперативной готовности трубопровода. Коэффициент оперативной готовности отражает вероятность успешного выполнения задач, связанных с прокладкой трубопровода, и обеспечением бесперебойного снабжения потребителей нефтепродуктами в течение заранее установленного времени. Также в исследовании приведён

пример расчёта этого коэффициента, который демонстрирует высокую эффективность выполнения поставленной задачи.

В статьях [126-129] Рыбаковым Ю.Н. с соавторами представлено научное обоснование вопросов, касающихся модернизации средств для транспортировки горючих материалов. В качестве ключевых направлений этой модернизации предложено использовать современные композиционные полимерные материалы. Авторы обосновывают возможность улучшения свойств этих материалов за счет оптимизации их состава и модификации поверхности полимерных композиционных материалов. Кроме того, в работе описаны инновационные конструктивные решения, которые позволяют разрабатывать эластичные резервуары и плоскосворачиваемые рукава нового поколения, обладающие оптимальными эксплуатационными характеристиками.

Работы В.А. Корнева и О.Е. Волкова совместно с коллегами [130-133] демонстрируют передовые решения конструкций гибких шлангов, применяемых для перекачки нефтепродуктов, подчеркивая важность разработки инновационных эластичных рукавов и полимерных трубопроводных систем, которые предполагается активно внедрять в качестве основных нагнетательных элементов при снабжении нефтепродуктами.

Статья [134] посвящена изучению конструктивных особенностей многослойных пленочных материалов, созданных на основе термопластичных полиуретанов (ТПУ). Приведена поэтапная структура композиционного материала, применяемого при изготовлении эластичных полимерных емкостей и плоскосворачиваемых рукавов, предназначенных для транспортировки и временного хранения нефтепродуктов. Демонстрируются образцы продукции, выпускаемой отечественными производителями.

В статьях Рыбакова Ю.Н. с соавторами [135-138] рассматриваются особенности структуры и физико-химических свойств полиуретанов, с

особым акцентом на термопластичные полиуретаны. В работе определяются такие характеристики, как стойкость этих материалов к абразивному износу и их морозостойкость. На основе анализа структуры полиуретанов и результатов проведенных испытаний авторы делают выводы о возможностях применения термопластичных полиуретанов в технических средствах для складирования нефтепродуктов. Эти средства могут использоваться в различных климатических условиях, включая регионы с крайне низкими температурами.

Харамова О.Д. и Рыбаков Ю.Н. в исследовании [139] выявили главные проблемы существующих резинотканевых рукавов, используемых Вооруженными Силами РФ. Их выводы свидетельствуют о том, что переход на термопластичные рукава способен увеличить рабочий температурный интервал на 10-15 °С, устранить воздействие материала рукава на качество топлива, существенно повысить прочность и долговечность изделий, а также уменьшить расход материалов примерно в 2,5 раза.

В статье авторов Тимофеева В.Д. и Егорова Д.С. [140] приводятся убедительные аргументы в пользу активного использования мобильных трубопроводных систем, выполненных из ПГР, для борьбы с лесными пожарами. Они доказывают, что такая технология является экономически выгодной и маневренной в качестве замены воздушному пожаротушению.

Демировым В.И. с соавторами в работе [141] была проведена оценка эффективности использования плоскостворачиваемых рукавов в рамках специальной военной операции (СВО). Исследование продемонстрировало, что эти рукава показали свою незаменимость при создании временных участков трубопровода для доставки топлива через преграды вместе с существующими полевыми магистралями, находящимися на снабжении армии. Помимо этого, авторы отметили, что установка такого типа рукавов не вызвала значительных трудностей у военнослужащих. Также отмечено, что плоскостворачиваемые гибкие рукава имеют потенциал для применения на сложных участках местности, включая водные преграды,

труднопроходимые и болотистые зоны, особенно в ситуациях, когда важно быстро осуществить переброску ресурсов и сохранить скрытность действий войск.

Артюхов Ю.О. в своей работе [142] описал современные области использования ПГР, практические случаи их эксплуатации, подходы к решению проблем нефтегазодобычи с применением плоскосворачиваемых рукавов, достигнутые результаты внедрения ПГР в различные отрасли промышленности, а также преимущества и недостатки рукавов данного типа.

В публикации [143] Бельский С.Г. с соавторами провели анализ возможности использования гибких трубопроводов для транспортировки жидкостей в тяжелых условиях окружающей среды. Рассмотрены конструкции и гидродинамические характеристики трубопроводов, необходимые для выполнения широкого спектра производственных задач и мероприятий как в бытовых условиях, так и в условиях чрезвычайных ситуаций.

В работе [144] Новиков С.Г. с соавторами отмечают, что улучшение ПГР в основном зависит от разработки усовершенствованных или даже новых их конструкций, обеспечивающих повышенную надёжность и длительный срок службы. Они подчёркивают возможности использования АТО из сверхпрочных волокон, новейших полимерных материалов и современных методик производства, способствующих созданию ПГР и мобильных трубопроводных систем на их основе.

В статье [145] Дремин А.В. с соавторами благодаря проведенному анализу подходов и процедур технического обслуживания ПНР, установили, что в настоящее время отсутствует законодательная база, определяющая правила, частоту проверок и конкретные требования испытаний рукавов высокого давления диаметром больше 150 миллиметров. Произведён обзор материалов, применяемых для производства крупногабаритных рукавов, и определены варианты адаптации имеющегося оборудования для тестирования пожарных рукавов.

Статьи [123-145] подчеркивают значимость и актуальность использования ПГР в настоящее время в различных отраслях промышленности от нефтедобычи до применения плоскосворачиваемых рукавов в зонах вооруженных конфликтов, но носят лишь описательный характер и не затрагивают структуры АТО и взаимодействие нитей в ней.

В исследовании Словикова С.В. [146] представлена методика проведения механических испытаний полиуретановых изделий при пониженной температуре. Представлены результаты исследований механических свойств полиуретана при сжатии и зависимость параметров от температуры. В развитие методики исследования свойств вязкоупругих материалов предложено совершенствование метода испытания полиуретановых втулок для определения динамических реологических характеристик и их зависимости от температуры.

В работе [147] Яковлева С.Н. описана экспериментальная установка для изучения нагревания и разрушения упругого полиуретанового обода. Автором получена эмпирическая формула для определения предельной температуры обода в зависимости от его скорости нагружения и относительной деформации.

В исследовании [148] автор приводит классификацию деталей из полиуретана по группам и определяет важнейший критерий, характеризующий их работоспособность, а именно температуру полиуретанового массива. Яковлевым С.Н. представлены экспериментально полученные зависимости модуля упругости от твердости, твердости от температуры и зависимость модуля упругости полиуретана от его температуры.

## 1.6. Анализ работ по расчету плосковорачиваемых гибких рукавов

В научной работе [149] Корневым В.А. изложены теоретические и практические принципы аналитического расчёта длинных инженерных конструкций (таких как канаты, тросы и балки) методом гибкой нити. Автор демонстрирует, каким образом данный расчёт может применяться к напорным рукавам, изготовленным из термопластичного полиуретана. Также в качестве подтверждения достоверности принципов автором проведена оценка полученных расчётов.

Исследование [150], проведённое Абашкиным М.В., описывает методы усиления адгезии слоёв в плосковорачиваемом рукаве, состоящем из АТО и слоев полиуретана. Определено влияние таких факторов, как количество поперечных нитей (нитей утка), тип переплетения ткани и степень крутки нитей. Результаты проведённого анализа позволяют создавать прочные ПГР, обладающие повышенной прочностью сцепления слоёв, а также оптимизировать производство уже имеющихся рукавов. Экспериментально доказано, что уменьшение количества поперечных нитей улучшает сцепление полиуретановых слоёв с тканой армирующей оболочкой. Саржевое переплетение 2/2 обеспечивает большую устойчивость к расслаиванию, нежели саржевое переплетение 2/1. Сокращение количества круток нити позитивно влияет на сопротивление разрыву слоёв лишь при наличии АТО, состоящих из толстых нитей (более 2000 текс). Во время процесса экструзии существуют разные методики укрепления межслойных связей, однако решающее значение имеет температура связующего.

В проведённом исследовании [151] Андреев В.М. определил характер поведения рукавов при изменениях внутреннего гидростатического давления. Автором установлено явление сохранения формы («эффект памяти») при понижении давления, а также установлена связь между изменением диаметра рукава и динамикой изменений давления. Эти сведения крайне важны для

повышения эффективности процессов производства рукавов и улучшения их механических качеств. Продолжение научных изысканий в данном направлении способно привести к созданию более качественных и долговечных рукавов, пригодных для использования в разных отраслях промышленности.

Корнев В.А. и Рыбаков Ю.Н. в работах [152-153] выполнили исследование распределения внутренних усилий и воздействия внешней среды на плоские напорные рукава, находящиеся под воздействием жидкости и внешних условий. Были проведены расчеты осевых и кольцевых нагрузок, жёсткости и растяжимости полиуретановых рукавов. Подтверждена высокая эластичность и механическая прочность полиуретановых рукавов, что позволяет успешно применять их в сложных климатических условиях и реальных условиях эксплуатации. Дополнительно рассмотрены методики оценки внешнего воздействия на напорные рукава и отобраны подходящие формулы для вычислений.

В работах Новикова С.Г. [154-155] предложены способы исследования силовых и геометрических параметров гибких эластичных нерастяжимых оболочек, которые состоят в том числе и из несущего тканого каркаса с нанесёнными на него односторонним или двухсторонним покрытиями (композиционный материал).

Несмотря на утверждения авторов, предложенные ими способы исследования силовых и геометрических параметров едва ли применимы для гибких эластичных композиционных оболочек (КО), т.к. последние состоят не из однородного, а гетерогенного материала: армирующего волокна и связующего. Именно такую структуру имеют ПГР. Для расчета КО на основе хорошо развитой теории расчета оболочек из однородных материалов авторам пришлось бы использовать так называемый феноменологический подход, который не учитывает неоднородность композита. При феноменологическом подходе композит условно принимается однородным материалом, для расчета которого используется хорошо развитая теория

нерастяжимых оболочек. Такой подход порождает проблемы, без решения которых едва ли можно говорить об эффективности такого метода расчета.

Выполнить расчет КО и спрогнозировать ее параметры еще на стадии проектирования без изготовления натуральных образцов не представляется возможным, т.к. для новой проектируемой композиционной части оболочки неоткуда взять необходимые для расчета физико-механические характеристики, которые зависят от целого ряда параметров. Довольно трудозатратен сам процесс экспериментального определения физико-механических характеристик, необходимых для расчета КО при феноменологическом подходе; изменение любого параметра формируемой оболочки, будь то прочностные характеристики армирующего каркаса, такие как геометрическая плотность ткани и линейные плотности ее нитей, физико-механические характеристики связующего, толщина стенки, и т.д. приводят к необходимости проведения серии трудоемких экспериментов по исследованию образцов, извлеченных из этой оболочки, для определения исходных данных для ее расчета. Поскольку цилиндрическая композиционная часть оболочки является сложно нагруженным анизотропным телом, то судить о ее прочности нельзя по значению лишь одной из компонент напряжений. Необходимо выбрать и обосновать критерий разрушения, и установить связанные с выбранным критерием поверхности прочности. Для обоснования выбранного критерия разрушения проводится целая серия опытов, и это является проблемой. При любом изменении параметров и технологии изготовления необходимы новые опыты, а это является весьма сложной и дорогостоящей технической задачей.

Методика расчета, основанная на феноменологическом подходе, не позволяет найти натяжение в армирующих нитях тканого каркаса, т.к. она не учитывает гетерогенности композита; нитей как таковых не существует, а есть некоторая однородная среда.

Таким образом, при использовании феноменологического подхода для расчета эластичной КО, возникают сложности, связанные с невозможностью

расчета и прогнозирования ее параметров еще на стадии проектирования без изготовления натурального образца.

Еще одним недостатком работ [154-155] является то, что практически во всех случаях оболочка принимается нерастяжимой. На практике же тканая оболочка ПГР и полиуретан не обладают достаточной жесткостью, чтобы увеличениями ее геометрических параметров ее можно было бы пренебречь.

Поэтому утверждение авторов о том, что ими разработан метод, позволяющий «быстро производить инженерные расчеты при проектировании и эксплуатации», не применимы к ПГР.

Статьи [149-155] не исследуют взаимодействия нитей в тканой оболочке плоскосворачиваемых рукавов с учетом вида переплетения при действии ВГД. В работах отсутствуют удобные зависимости для инженерных расчетов разрывных давлений в ПГР.

К настоящему времени опубликовано относительно малое количество работ по расчету и проектированию ПГР. Последнее объясняется, по нашему мнению, тем, что технологии производства гибких плоскосворачиваемых рукавов возникли сравнительно недавно. Поэтому разработке методов расчета и проектирования ПГР не было уделено значительное внимание.

Основоположниками по разработке методов расчета и проектирования ПГР являются Степанов С.Г. и Бахарев Б.А., в работах которых [156-158] авторами детально описывается их назначение, конструктивные особенности, технология производства и проблемы, возникающие на этапах проектирования и изготовления, приводятся основная зависимость для расчета разрывного давления в ПГР. Недостатком работ этих авторов является то, что они пренебрегают влиянием связующего (полиуретана) и рассматривают лишь одну армирующую тканую оболочку.

Данные публикации не отражают в полной мере поведение ПГР под действием ВГД, а теоретические положения и методы расчета на прочность ПГР не учитывают ряд важных особенностей работы и имеют следующие недостатки: возрастание неточности при расчете ПГР со связующим,

имеющим более высокий модуль упругости, т.к. в этом случае его влиянием уже нельзя пренебречь; отсутствие возможности оценки влияния характеристик связующего на прочность ПГР; полученные зависимости по прочностному расчету ПГР не учитывают увеличение геометрической плотности ткани армирующей оболочки и радиуса рукава, обусловленные действием ВГД; получены условия прочности ПГР лишь для случая разрыва уточных нитей АТО, а разрушение рукава от разрыва основных нитей вообще не рассмотрено.

Поскольку в дальнейшем будет показано, что теоретические разработки, применимые к ПГР, могут быть распространены и на случай близких к ним по структуре пожарным напорным рукавам (ПНР), то целесообразно проанализировать работы по методам расчета этих изделий. Существующие методы расчета ПНР [159-167] не могут быть использованы для расчета ПГР, хотя ПНР и ПГР имеют общий принцип работы – основную нагрузку от ВГД воспринимает АТО. Существуют и ключевые различия, которые значительно влияют на их прочностные характеристики. Эти различия касаются, прежде всего, материала. ПНР традиционно изготавливаются из резины или латекса, обладающих существенно иными механическими свойствами по сравнению с полиуретаном. Кроме того, устройство армирующей тканой оболочки у ПНР иное. Как правило, в пожарных рукавах используется полотняное переплетение в отличие от саржевого в ПГР, а также различаются технологии изготовления. ПНР в большинстве случаев неспособны выдерживать высокое гидравлическое давление, которое имеет место в ПГР. Недостатком работ по методам расчета ПНР является также то, что авторами не учитывается связующее (латекс или резина). Поэтому методы расчета и проектирования ПНР не могут быть распространены на ПГР.

### 1.7. Постановка целей и задач исследования

Проведенный анализ публикаций позволил сформулировать цели и конкретизировать задачи работы.

Целями настоящего исследования является проектирование рациональных структур ПГР, снижение их материалоемкости при соблюдении условий прочности на основе применения разработанной научно обоснованной методики расчета и проектирования их рациональных структур, позволяющей прогнозировать несущую способность рукавов с учётом взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке при действии внутреннего гидростатического давления.

Данные цели достигаются разработкой положений и решением следующих задач:

1) разработкой обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР на основе переплетения саржа  $1/2$  при действии внутреннего гидростатического давления перекачиваемого продукта;

2) получением удобных для практического применения зависимостей для расчета несущей способности ПГР, связывающих внутреннее давление в рукаве со средними силами растяжения в уточной нити и связующем, геометрической плотностью ткани АТО по утку, радиусом и толщиной стенки ПГР;

3) выводением условий прочности по уточным и основным нитям АТО для недопущения разрыва ПГР от действия ВГД перекачиваемого продукта;

4) определением двух видов разрывных давлений: разрывные давления, обусловленные разрушением как уточных, так и основных нитей;

5) получением и подтверждением достоверности зависимостей для расчета разрывных ВГД, как основы для методики расчета и проектирования ПГР и близких к ним по структуре НПР;

6) разработкой методики расчета и проектирования ПГР при действии ВГД.

Разработанная методика расчета и проектирования ПГР должна отражать в полной мере поведение рукавов под действием ВГД перекачиваемого продукта, теоретические положения, учитывающие важные особенности работы, а именно:

1) влияние связующего, которым в некоторых случаях пренебречь уже нельзя (например, при связующем, имеющим более высокий модуль упругости), что позволит оценить его вклад в обеспечение прочности ПГР, а сами расчеты сделать более точными;

2) прочностной расчет ПГР должен учитывать увеличение геометрической плотности ткани армирующей оболочки по нитям основы и утка и радиуса рукава, обусловленные действием ВГД, т.к. АТО ПГР и полиуретан не обладают достаточной жесткостью, чтобы такими увеличениями можно было бы пренебречь;

3) получение условий прочности ПГР не только для случая разрыва уточных нитей АТО, но и при разрушении рукава от разрыва основных нитей, так как такой случай при неправильном проектировании возможен.

Разработанная методика расчета и проектирования ПГР должна быть лишена недостатков, выявленных в результате анализа работ по расчету и проектированию ПГР [156-158] и расчету ПНР [159-167].

### **Выводы по главе**

1. Проанализированы основные сведения, назначение, характеристики и преимущества, конструкция и области применения ПГР, а также ГОСТы, регламентирующие изготовление и испытания рукавов данного типа.

2. Изучены и проанализированы публикации по механике нити и теории строения ткани, а также прочностному расчету ПГР при действии ВГД.

3. Полученные другими авторами зависимости и теоретические положения для прочностного расчета ПГР, имеют недостатки и не учитывают нюансы работы ПГР.

4. Выявлена необходимость разработки новой, усовершенствованной методики расчета и проектирования ПГР при действии ВГД, которая учитывает, в отличие от ранее опубликованных работ других авторов, особенности взаимодействия нитей в АТО ПГР и влияние связующего.

5. Сформулированы цели и задачи исследования.

## **ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ ГИБКИХ РУКАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

### **2.1. Система допущений для нитей армирующей тканой оболочки плоскосворачиваемых гибких рукавов и материала, из которого они состоят**

Для разработки обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в ткани АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 и полиуретанового связующего при действии ВГД воспользуемся принципами аналитического исследования структуры однослойных тканей в нелинейной постановке с учетом ряда упрощающих допущений. Эти допущения позволяют получить аналитически решаемую задачу, достоверную реальности в рамках определенных границ [13, 168].

Перед разработкой обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в ткани АТО ПГР при действии ВГД нами принята следующая система допущений по отношению к нитям и материалу, из которого эти нити состоят [169, 170]:

1. Изотропность, однородность и сплошность материала нитей предполагает, что материал нитей обладает одинаковыми свойствами во всех направлениях, его структура однородна по всей длине и сечению, и отсутствуют внутренние пустоты, то есть материал нити обладает сплошностью. На практике это означает, что мы пренебрегаем микроструктурой волокон, из которых состоит нить, рассматривая ее как сплошное однородное тело. В реальности нити состоят из множества отдельных волокон, их ориентация может быть неидеальной, а внутри самой нити могут присутствовать микроскопические пустоты. Данное допущение позволяет упростить расчеты, используя стандартные механические характеристики материала нитей.

2. Жесткость нитей на изгиб и растяжение. Это допущение учитывает способность нитей сопротивляться как растягивающим, так и изгибающим усилиям. Жесткость на изгиб определяется модулем Юнга материала нитей и моментом инерции поперечного сечения нити. Это допущение необходимо для учета изгибающих моментов, возникающих в нитях под действием внутреннего давления перекачиваемого продукта и геометрии переплетения АТО. В реальности жесткость на изгиб может зависеть от кривизны оси нити и других факторов.

3. Гипотеза плоских сечений, предложенная Бернулли, является одним из упрощений в механике деформируемого тела, применимым в нашем случае к анализу поведения тонких нитей под нагрузкой. Ее суть заключается в предположении, что плоское поперечное сечение нити перпендикулярное к её оси в недеформированном состоянии, останется плоским и после приложения нагрузки, даже при ее изгибе. Такое допущение значительно облегчает математическое описание процесса деформирования и позволяет установить прямую связь не только между деформациями и напряжениями в поперечном сечении, но и геометрическими характеристиками деформации – кривизной самой нити. Важно подчеркнуть, что точность гипотезы зависит от величины деформаций и характера напряжённого состояния в нити. При больших деформациях, особенно при наличии значительных сдвиговых напряжений, или при сложном напряженном состоянии, плоскостность поперечного сечения может нарушаться. Однако, в рамках большинства задач, в том числе и рассматриваемой, гипотеза плоских сечений обеспечивает заведомо точное приближение и существенно упрощает вычисления.

4. В настоящей задаче мы используем геометрически нелинейную и физически линейную постановку. Это означает, что мы принимаем во внимание, что перемещения точек осевой линии нити могут быть большими. Такое свойство учитывает изменение геометрии нити под действием нагрузки. При этом мы предполагаем, что материал нити ведет себя

линейно-упруго, подчиняясь закону Гука. Физическая линейность означает, что напряжение в нити пропорционально её деформации. Это простое соотношение, описываемое законом Гука, значительно упрощает математическую модель. Таким образом, мы получаем модель, достаточно точную для практических расчетов, но при этом относительно простую для аналитического или численного решения.

Актуальность и оправданность применения каждого из этих допущений описывается в [103] и [169].

## **2.2. Основное геометрическое соотношение (условие совместности прогибов) для армирующей тканой оболочки плоскостворачиваемых гибких рукавов на основе саржи 1/2**

Для исследования однослойных тканей на основе полотняного переплетения используется известное геометрическое соотношение Новикова Н.Г. – сумма высот волн изгиба нитей основы и утка равна сумме их диаметров [14, 43, 103]. Однако данное геометрическое соотношение не может быть использовано в случае тканей саржевого переплетения. Поэтому для АТО ПГР на основе саржи 1/2 должно быть получено новое основное геометрическое соотношение (условие совместности прогибов).

Анализ структуры АТО ПГР указывает на их однослойную конструкцию, состоящую из бесшовных оболочек с наиболее часто используемым для рукавов переплетением, саржа 1/2. Данное переплетение нитей образует взаимосвязанную прочную и гибкую структуру. Такое строение позволяет АТО ПГР эффективно распределять и воспринимать значительные нагрузки, возникающие при действии ВГД перекачиваемого продукта. Это давление стремится как увеличить радиус рукава, так и растянуть рукав в осевом направлении. АТО препятствует этим деформациям и возможному разрушению ПГР. Геометрия переплетения, в данном случае

саржа  $1/2$ , является важным фактором, определяющим механические свойства всей конструкции.

Используем основные положения работы [13] для исследования взаимодействия нитей и получения геометрического соотношения (условие совместности прогибов) для АТО ПГР на основе переплетения саржа  $1/2$ .

В работе [13] при рассмотрении переплетения саржа  $1/2$  (рисунок 2.1) и расчётной схемы взаимодействия нитей основы и утка в ткани данного переплетения при действии сосредоточенных сил (рисунок 2.2) получены следующие выражения для геометрических параметров (2.1), (2.2).

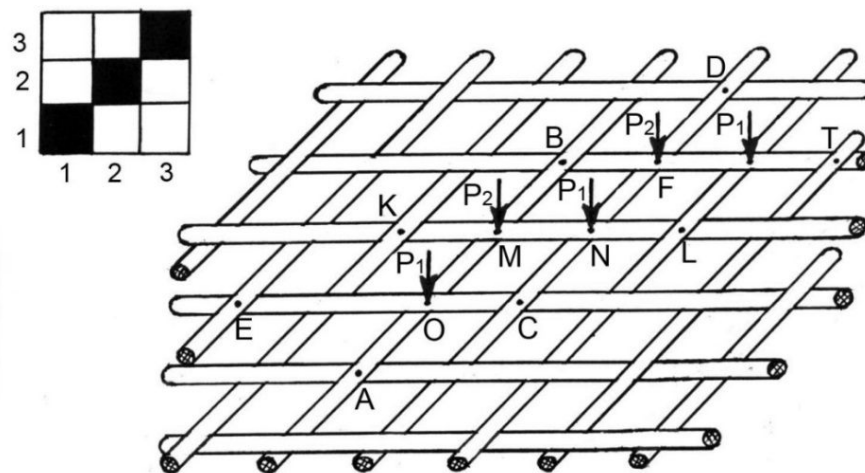


Рисунок 2.1 - Рисунок взаимодействия нитей в переплетении саржа  $1/2$  [13]

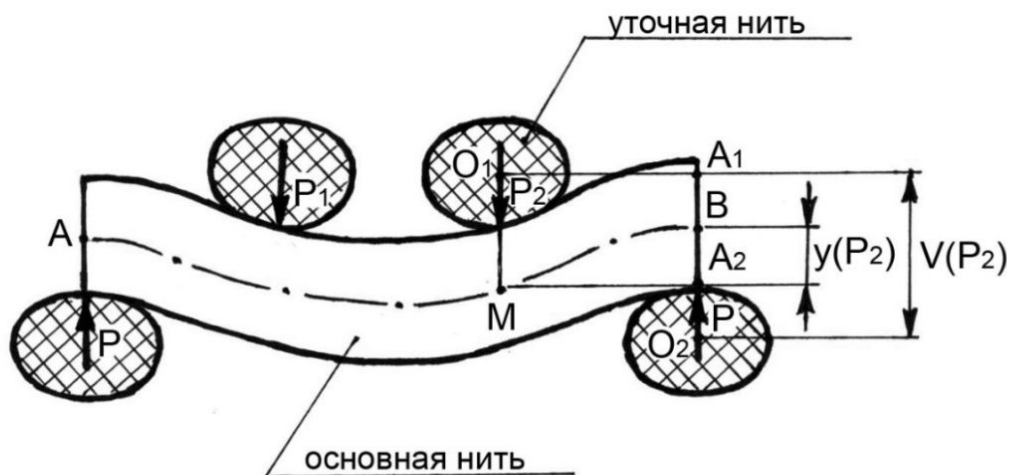


Рисунок 2.2 - Расчетная схема взаимодействия нитей основы и утка в ткани с переплетением саржа  $1/2$  при действии сосредоточенных сил [13]

$$BO_2 = 0,5[\eta_{OB}(P)d_o + \eta_{VB}(P)d_y], \quad (2.1)$$

$$MO_1 = 0,5[\eta_{OB}(P_2)d_o + \eta_{VB}(P_2)d_y], \quad (2.2)$$

где  $d_o, d_y$  – диаметры основной и уточной нитей соответственно;

$\eta_{OB}(P), \eta_{VB}(P)$  – коэффициенты вертикального смятия основной и уточной нитей в краевом сечении основной нити (в точке приложения усилия  $P$ );

$\eta_{OB}(P_2), \eta_{VB}(P_2)$  – коэффициенты вертикального смятия соответственно основной и уточной нитей (в точке приложения усилия  $P_2$  [13]).

Наряду с этим, имеем [13]:

$$A_2O_2 = BO_2 - Y(P_2), \quad (2.3)$$

$$A_1B = A_1A_2 - Y(P_2) = MO_1 - Y(P_2), \quad (2.4)$$

$$A_1B + Y(P_2) + A_2O_2 = V(P_2). \quad (2.5)$$

Подставляя формулы (2.3) и (2.4) в (2.5) с учетом (2.1) и (2.2), после преобразований имеем [13]:

$$Y(P_2) + V(P_2) = 0,5[\eta_{OB}(P)d_o + \eta_{VB}(P)d_y] + 0,5[\eta_{OB}(P_2)d_o + \eta_{VB}(P_2)d_y]. \quad (2.6)$$

Как частный случай из (2.6) следует известное соотношение для тканей полотняного переплетения Н.Г. Новикова. Покажем это. По расчётной схеме, на рисунке 2.3 (взаимодействие нитей при полотняном переплетении), смятие по вертикали нитей одной системы в зонах контакта с нитями другой системы одинаковое, а прогибы основы и утка равны высотам волн изгиба нитей  $h^o$  и  $h^y$  соответственно [13]. Поэтому:  $\eta_{OB}(P) = \eta_{OB}(P_2) = \eta_{OB}$ ;  $\eta_{VB}(P) = \eta_{VB}(P_2) = \eta_{VB}$ ;  $Y(P_2) = h^o$ ;  $V(P_2) = h^y$ .

С учётом последних равенств, из (2.6) получаем соотношение Н.Г. Новикова (2.7) [14, 43]:

$$h^o + h^y = d_o\eta_{OB} + d_y\eta_{VB}. \quad (2.7)$$

Соотношение (2.6), как это было показано в [13] распространяется на случай, если взаимодействие нитей смоделировано участками с распределённой нагрузкой. Для этого под  $P_2$  и  $P$  в (2.6) подразумеваются равнодействующие от распределённых нагрузок, линии действия которых проходят через центры сечений нитей [13]:

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

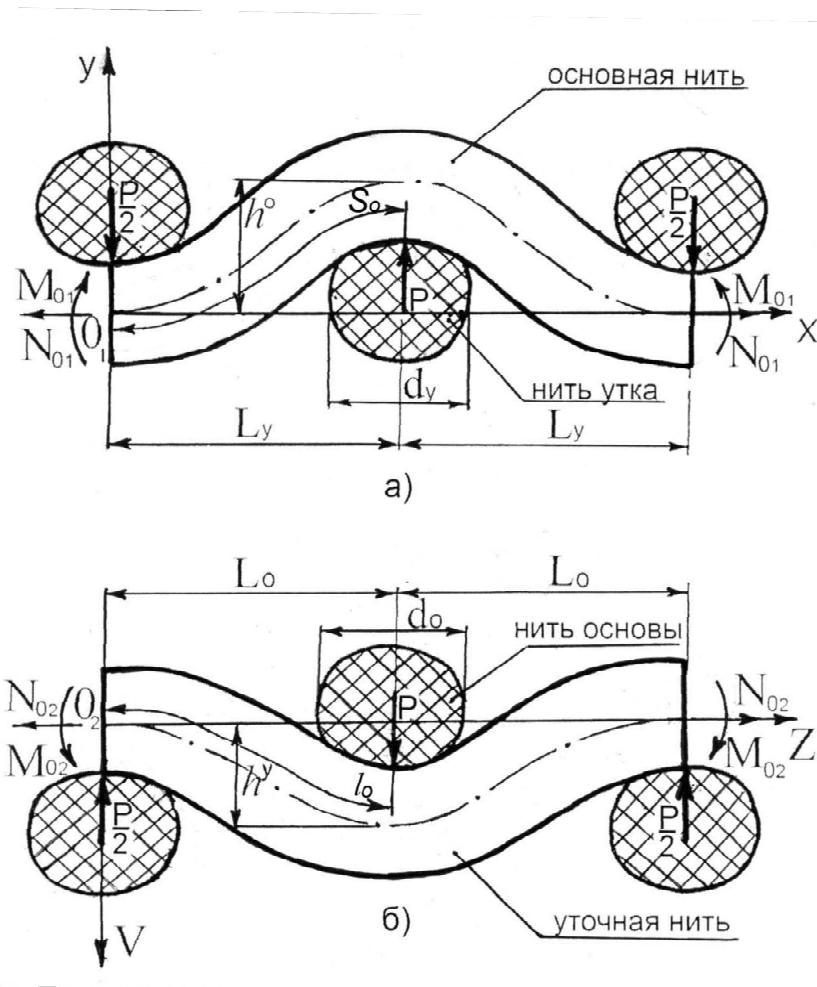


Рисунок 2.3 - Расчетная схема отрезка основной нити под воздействием внешних сосредоточенных сил (полотняное переплетение) [13]

Таким образом, суть соотношения (2.6) (условие совместности прогибов) для саржи 1/2 формулируется так: сумма прогибов нитей основы и утка в зоне их контакта равна половине слагаемого от сумм диаметров нитей с учётом смятия в рассматриваемой зоне контакта и в краевом сечении расчётной модели [13, 164].

Уравнение (2.6), описывающее совместимость прогибов, верно только при условии [13]:

$$U(P_2) > 0, V(P_2) > 0, \quad (2.8)$$

либо равенства нулю одного из этих прогибов, и теряет всякий смысл в случае нарушения контакта между нитями, что имеет место при  $U(P_2) < 0$ ,  $P_2=0$  или  $V(P_2) < 0$ ,  $P_2=0$  [13].

Полученные в п.2.2 соотношения с учетом условий (2.8), будут использованы нами ниже при разработке обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 при действии ВГД.

### **2.3. Обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке плосковорачиваемых гибких рукавов на основе переплетения саржа 1/2**

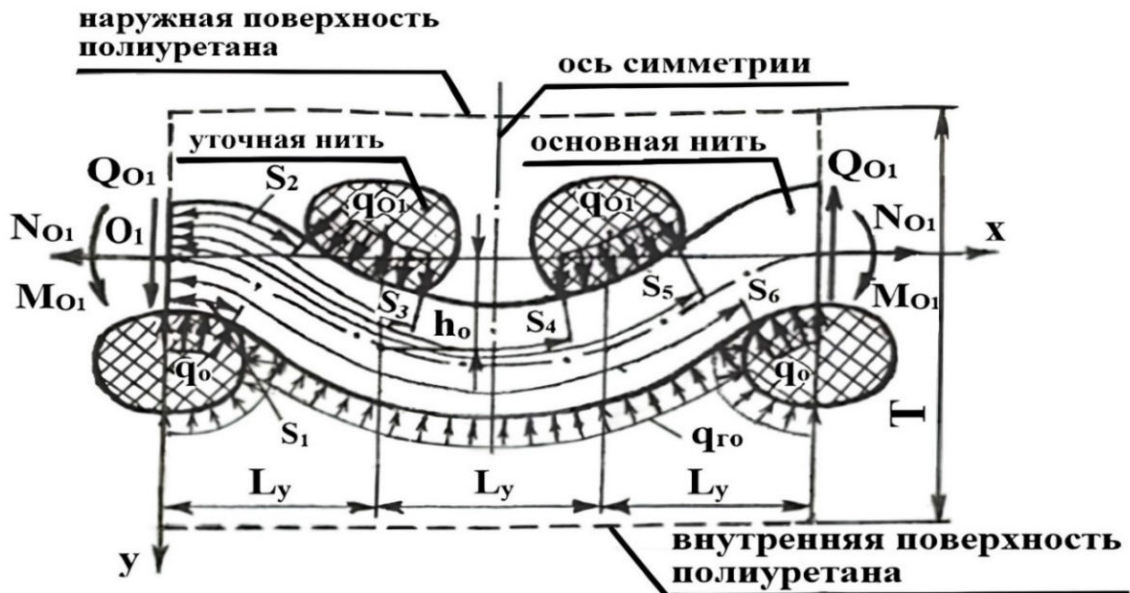
Для разработки обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР с переплетением саржа 1/2 примем во внимание представленную в п.2.1 систему допущений по отношению к нити и материалу, из которого она состоит.

Структура АТО имеет проложенные вдоль оси рукава основные нити, взаимно переплетающиеся с уточными нитями, которые в свою очередь располагаются по его окружности. АТО ПГР воспринимает большую часть нагрузки от действия ВГД и тем самым обеспечивает высокое рабочее давление рукава [171, 172, 173, 174].

Для получения теоретических положений и вывода зависимости для прочностного расчета ПГР используем основы нелинейной теории строения тканей главных переплетений предложенные Степановым С.Г. в работе [13].

Исследуем взаимодействие отрезков основной (рисунок 2.4, а) и уточной (рисунок 2.4, б) нитей АТО ПГР без слоев полиуретана, на основе

саржи 1/2 под действием внутренних и внешних силовых факторов. Данные отрезки нитей в АТО взаимно переплетены, взаимодействуют между собой и представляют периодически повторяющийся элемент.



а)



б)

Рисунок 2.4 - Расчетная схема равновесия отрезков основной (а) и уточной (б) нитей АТО

ПГР на основе саржи 1/2 под действием внешних и внутренних силовых факторов

На рисунке 2.4 а, б [13, 103, 169, 175] использованы обозначения:

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

$q_{ГО}, q_{ГУ}, q_O, q_U, q_{O1}, q_{U1}$ , - равномерно распределенные нагрузки на единицы длин отрезков нитей, которые принимаем направленными по нормальям к осям и контурам их поперечных сечений;

$s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ , - координаты действия распределенных нагрузок, находящихся в зонах взаимодействия нитей.

$T$  - толщина стенки ПГР;

$O_1, O_2$  – начала систем координат  $vO_1z$  и  $yO_2x$ ;

$h_O, h_U$  – вертикальные смещения центров сечения нитей под действием нагрузок (прогибы отрезков основной и уточной нитей);

$L_O, L_U$  – геометрические плотности ткани АТО ПГР по основе и утку;

$\theta$  - угол наклона краевых поперечных сечений отрезков нитей.

Получим выражения для распределенных нагрузок  $q_{ГО}, q_{ГУ}$ , действующих на рассматриваемые отрезки уточной и основной нитей (рисунок 2.4), обусловленных действием внутреннего гидростатического давления в ПГР. На внутреннюю поверхность полиуретана будет передаваться давление от находящегося внутри рукава перекачиваемого продукта интенсивностью  $p$  и перераспределяться на давление на отрезки нитей. Отрезок основной нити в этом случае будет полностью без потерь воспринимать давление, передаваемое через внутренний слой полиуретана, а в отрезке нити утка со слоем полиуретана, только часть давления будет воспринимать уточная нить, а часть слой полиуретана из-за возникающих натяжений в нити и продольных усилий в ее краевых сечениях, обусловленных действием ВГД.

На основании этого можно сделать вывод, что при наличии ВГД в ПГР интенсивностью  $p$  на каждый из рассматриваемых отрезков нитей действуют приведённые к единице их длин давления [169]:

для уточной нити

$$q_{ГУ} = 0,5\mu_{УВ}pL_{У}, \quad (2.9)$$

для основной нити

$$q_{ГО} = 0,5pL_{О}, \quad (2.10)$$

где  $\mu_{УВ}$  - коэффициент, характеризующий какая часть нагрузки воспринимается уточной нитью ( $0 < \mu_{ОВ} < 1$ ).

Если добавить к представленным на рисунке. 2.4 отрезкам основных и уточных нитей слои полиуретана, приходящиеся на каждый из них, то получим периодически повторяющийся элемент (ППЭ) ткани оболочки со слоями полиуретана стенки ПГР.

Воспользуемся следующим положением из ранее проведенного исследования [169], а именно: «объем полиуретана, приходящийся на отрезок основной нити, определяется как разница между объемом параллелепипеда с длиной  $3L_{У}$  и поперечным сечением  $L_{О}$  на  $T$  и объемом изогнутой основной нити, а объем полиуретана, приходящийся на отрезок утка, будет иметь форму изогнутого параллелепипеда с длиной  $3L_{О}$  и поперечным сечением  $L_{У}$  на  $T$  за вычетом объема изогнутой уточной нити».

Также принимаем, согласно [164, 169, 175], что: «угол между двумя прямыми, исходящими из центра поперечного сечения ПГР, одна из которых совпадает с осью симметрии, а вторая проходит через центр любого из крайних сечений уточной нити (рисунок 2.4, б), с достаточной точностью определяется по формуле»:

$$\theta = \frac{1,5L_{О}}{R + 0,5T}, \quad (2.11)$$

где  $R$  – внутренний радиус ПГР.

Используем допущение, по аналогии с [169, 175], а именно, считаем, что давления  $q_{ГУ}$  и  $q_{ГО}$  равномерно распределены и направлены по нормальям

к осям и контурам поперечных сечений нитей (рисунок 2.4, а, б), а также примем, что все действующие на контуры поперечных сечений нитей распределенные нагрузки  $q_{ГУ}$  и  $q_{ГО}$  будут передаваться в зоны контакта между нитями и определяться соотношениями (2.9) и (2.10), которые будем считать равномерно распределенными и направленными по нормальям к осям нитей [13, 103]. Помимо нагрузок  $q_{ГУ}$  и  $q_{ГО}$ , от действия ВГД в зонах контакта между нитями будут действовать распределенные нагрузки, обусловленные как ненулевыми изгибными жесткостями нитей, так и их натяжением, как справедливо отмечается в [164, 169]. Обозначим суммарные нагрузки от этих факторов со стороны средних основных нитей на уток в зонах контакта от  $l_2$  до  $l_3$  и от  $l_4$  до  $l_5$  соответственно через  $q_{У1}$ , а со стороны крайних основных нитей на уток в зоне контакта  $q_{У}$  от 0 до  $l_1$  и от  $l_6$  до  $l_*$  (где  $l_*$  - полная длина рассматриваемого отрезка уточной нити) (рисунок 2.4, б). Со стороны средних уточных нитей на основу в зонах контакта от  $s_2$  до  $s_3$  и от  $s_4$  до  $s_5$  будут передаваться распределенные нагрузки  $q_{О1}$ , а со стороны крайних уточных нитей на основу в зонах контакта от 0 до  $s_1$  и от  $s_6$  до  $s_*$  (где  $s_*$  - полная длина рассматриваемого отрезка основной нити) (рисунок 2.4, а) будет действовать распределенная нагрузка  $q_{О}$  [175].

Оставим в силе допущение [164, 169] о том, что нагрузки  $q_{У1}$ ,  $q_{У}$ ,  $q_{О1}$ ,  $q_{О}$  равномерно распределены и направлены по нормальям к осям нитей.

Используем теоретические положения строения ткани переплетения саржа 1/2 [13].

Введем системы координат  $yO_1x$  и  $vO_2z$ , где их начала  $O_1$  и  $O_2$  будут совпадать с точками пересечения осевых линий нитей с плоскостями, которые проходят через центры соответственно основной (рисунок. 2.4, а) и уточной (рисунок. 2.4, б) нитей [13, 103, 164].

Для получения обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в ткани АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 при действии ВГД используем теоретические положения и алгоритмы из работ [13, 175], которыми автор воспользовался при выводе обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в ткани полотняного переплетения.

Исследуем равновесие фрагмента уточной нити длиной  $dl$ , вырезанного на участке  $l_1$  (рисунок 2.4, б) с распределенной нагрузкой  $q^y$  (рисунок 2.5) [13].

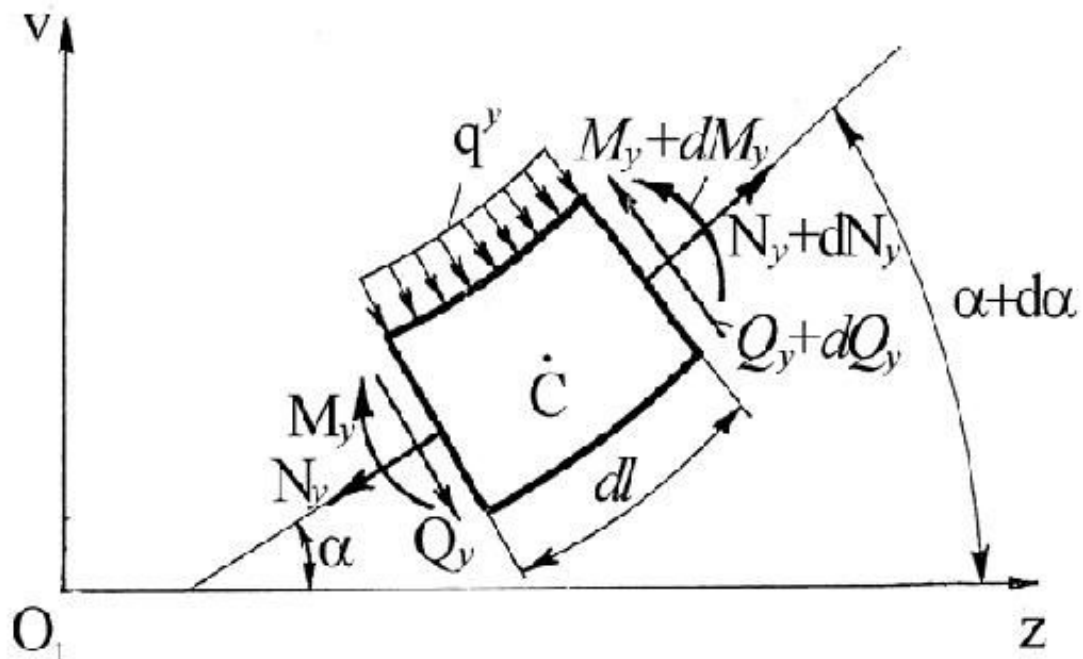


Рисунок 2.5 - Равновесие элемента уточной нити АТО ПГР под действием внешних и внутренних сил [13]

Под равнодействующей внешней нагрузкой  $q^y$  будем понимать результат сложения нагрузок  $q_y$ ,  $q_{гy}$ . Данный фрагмент находится в равновесии под действием внешней нагрузки и внутренних сил в сечениях элемента (рисунок 2.5) [13, 103, 175].

Проецируя все силы, действующие на рассматриваемый фрагмент нити на оси  $z$  и  $v$ , получим [13, 103, 164, 175]:

$$\begin{aligned}
Q_y \sin \alpha - (Q_y + dQ_y) \sin(\alpha + d\alpha) - N_y \cos \alpha + (N_y + dN_y) \cos(\alpha + d\alpha) + q_z^y dl = 0, \\
-Q_y \cos \alpha + (Q_y + dQ_y) \cos(\alpha + d\alpha) - N_y \sin \alpha + (N_y + dN_y) \sin(\alpha + d\alpha) - q_v^y dl = 0.
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Не учитывая малые величины второго порядка и принимая, что  $q_z^y = q^y \sin \alpha$ ,  $q_v^y = q^y \cos \alpha$  после преобразования уравнений (2.12), по аналогии с работами [13, 175]: получим:

$$\begin{aligned}
\frac{dN_y}{dl} \cos \alpha - N_y \frac{d\alpha}{dl} \sin \alpha - \frac{dQ_y}{dl} \sin \alpha - Q_y \frac{d\alpha}{dl} \cos \alpha + q^y \sin \alpha = 0, \\
\frac{dN_y}{dl} \sin \alpha + N_y \frac{d\alpha}{dl} \cos \alpha + \frac{dQ_y}{dl} \cos \alpha + Q_y \frac{d\alpha}{dl} \sin \alpha - q^y \cos \alpha = 0.
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Приняв, что  $q^y$  действует на весь рассматриваемый отрезок нити утка АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 (рисунок 2.4, б), имеем [13]

$$q^y = q_v [1 - H(l - l_1) + H(l - l_6)] - q_{v1} [H(l - l_2) - H(l - l_3) + H(l - l_4) - H(l - l_5)] - q_{ГV}, \tag{2.14}$$

где  $l$  — текущая координата;

$H(l - l_j)$  — функции Хевисайда [34].

Проведем преобразование уравнений (2.13). Умножим первое уравнение на  $\cos \alpha$ , а второе на  $\sin \alpha$ , и произведем их сложение. После преобразований с учетом основного тригонометрического тождества  $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$ , получим уравнение (2.15) [13, 164, 175]:

$$\frac{dN_y}{dl} - Q_y \frac{d\alpha}{dl} = 0. \tag{2.15}$$

Теперь умножим первое уравнение из (2.13) на  $\sin \alpha$ , а второе на  $\cos \alpha$  и сложим. После умножения полученного выражения на  $-1$  и последующих преобразований имеем [13, 175]:

$$\frac{dQ_y}{dl} + N_y \frac{d\alpha}{dl} - q^y = 0 \quad (2.16)$$

Для дальнейших преобразований составим уравнение равновесия элемента нити АТО ПГР длиной  $dl$  в виде равенства нулю суммы моментов всех сил относительно точки С (рисунок. 2.5), получим [13, 164, 103]:

$$M_y + dM_y - M_y + (Q_y + dQ_y) \frac{dl}{2} + Q_y \frac{dl}{2} = 0 \quad (2.17)$$

Отбросив в уравнении (2.17) величины второго порядка малости, имеем [13, 164, 175]:

$$\frac{dM_y}{dl} + Q_y = 0 \quad (2.18)$$

Учитывая зависимость между изгибающим моментом в сечении и приращением угла  $\alpha$  поворота плоскости сечения [13, 164, 175]:

$$M_y = A_y \frac{d\alpha}{dl}, \quad (2.19)$$

где  $A_y$  - изгибная жесткость уточной нити.

Выразив (2.18) через (2.19) (2.18) имеет вид [13, 164, 175]:

$$A_y \frac{d^2\alpha}{dl^2} + Q_y = 0. \quad (2.20)$$

Для любой точки, лежащей на изогнутой оси отрезка нити утка АТО ПГР, будут достоверны следующие зависимости:

$$\frac{dv}{dl} = \sin \alpha, \quad (2.21)$$

$$\frac{dz}{dl} = \cos \alpha. \quad (2.22)$$

Получим систему уравнений для отрезка нити утка АТО ПГР, объединив выражения (2.15), (2.16), (2.20), (2.21), (2.22) [13]:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dN_y}{dl} - Q_y \frac{d\alpha}{dl} &= 0, \\
 \frac{dQ_y}{dl} + N_y \frac{d\alpha}{dl} - q^y &= 0, \\
 A_y \frac{d^2\alpha}{dl^2} + Q_y &= 0, \\
 \frac{dv}{dl} &= \sin \alpha, \\
 \frac{dz}{dl} &= \cos \alpha.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Аналогичная (2.23) система может быть получена и для отрезка нити основы АТО ПГР (рисунок 2.4, а) [13, 103]:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dN_o}{ds} - Q_o \frac{d\varphi}{ds} &= 0, \\
 \frac{dQ_o}{ds} + N_o \frac{d\varphi}{ds} - q^o &= 0, \\
 A_o \frac{d^2\varphi}{ds^2} + Q_o &= 0, \\
 \frac{dy}{ds} &= \sin \varphi, \\
 \frac{dx}{ds} &= \cos \varphi,
 \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

где  $A_o$  — изгибная жесткость нити основы АТО ПГР;

$N_o$ ,  $Q_o$  — текущие значения продольного и поперечного усилий соответственно в сечениях отрезка нити основы АТО ПГР;

$s$  — текущая координата деформированной оси отрезка нити основы АТО ПГР;

$\varphi$  — текущее значение угла поворота плоскости сечения отрезка нити основы;

$y, x$  — координаты произвольной точки осевой линии отрезка нити основы в осях соответственно  $O_2y$  и  $O_2x$ .

Функция  $q^o$ , определяющая действие распределенной нагрузки, приложенной ко всему отрезку основы АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 (рисунок 2.4, а), будет иметь вид [13, 103, 164]:

$$q^o = q_o [1 - H(s - s_1) + H(s - s_6)] - q_{o1} [H(s - s_2) - H(s - s_3) + H(s - s_4) - H(s - s_5)] + q_{ro}, \quad (2.25)$$

где  $s$  — текущая координата;

$H(s - s_j)$  — функции Хевисайда [34].

Рассмотрим неизвестные, которые входят в системы уравнений для нитей утка (2.23) и основы (2.24) АТО ПГР. Неизвестные величины распределенных нагрузок  $q_y, q_{y1}$ , входящие в систему (2.23), действуют со стороны основных нитей на нити утка в контактной зоне. В то же время в системе (2.24) неизвестные распределенные нагрузки  $q_o, q_{o1}$  в зоне контакта действуют наоборот, со стороны уточных нитей на нити основы.

Равенство усилий в зоне контакта нитей АТО ПГР позволяет записать такие интегральные соотношения [13, 103, 175]:

$$\int_{l_2}^{l_3} q_{y1} \cos \alpha dl = \int_{s_2}^{s_3} q_{o1} \cos \varphi ds, \quad (2.26)$$

$$\int_0^{l_1} q_y \cos \alpha dl = \int_0^{s_1} q_o \cos \varphi ds \quad (2.27)$$

Записав уравнение равенства нулю суммы проекций всех усилий на ось  $y$ , действующих на отрезок нити основы (рисунок 2.4, а), имеем:

$$-\int_0^{s_1} q_o \cos \varphi ds - \int_0^{s^*} q_{ro} \cos \varphi ds + \int_{s_2}^{s_3} q_{o1} \cos \varphi ds + \int_{s_4}^{s_5} q_{o1} \cos \varphi ds - \int_{s_6}^{s^*} q_o \cos \varphi ds = 0 \quad (2.28)$$

Спроецировав на ось  $v$  все силы, действующие на отрезок нити утка (рисунок 2.4, б), имеем:

$$-\int_0^{l_1} q_V \cos\alpha dl + \int_0^{l^*} q_{TV} \cos\alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos\alpha dl + \int_{l_4}^{l_5} q_{V1} \cos\alpha dl - \int_{l_6}^{l^*} q_V \cos\alpha dl - 2N_{O_2} \sin\theta = 0 \quad (2.29)$$

В рассматриваемом случае взаимодействие нитей по расчетной схеме на рисунке 2.4 смоделировано не сосредоточенными силами, а участками с распределенной нагрузкой. Чтобы основное геометрическое соотношение (условие совместности прогибов) для АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 (2.6) соответствовало случаю распределенной нагрузки, необходимо под силами  $P_2$  и  $P$  понимать равнодействующие от распределенных нагрузок с условием, что линии их действия проходят через центры сечений нитей [13]. Тогда соотношение (2.6) будет иметь вид:

$$y(q_{O1}) + v(q_{V1}) = 0,5[\eta_{OB}(q_O)d_O + \eta_{VB}(q_V)d_V] + 0,5[\eta_{OB}(q_{O1})d_O + \eta_{VB}(q_{V1})d_V], \quad (2.30)$$

где  $y(q_{O1}) = h_O$ ;  $v(q_{V1}) = h_V$  - прогибы основной и уточной нитей в вертикальных плоскостях, проходящих через центры их сечений (рисунок 2.4) [13, 103];

$\eta_{OB}(q_O), \eta_{VB}(q_V), \eta_{OB}(q_{O1}), \eta_{VB}(q_{V1})$  - коэффициенты вертикального смятия соответственно основной и уточной нитей в точках приложения распределенных нагрузок.

Объединив системы уравнений (2.23), (2.24) с уравнениями (2.28), (2.29), (2.30), получим обобщенную систему уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2:

$$\begin{aligned}
& \frac{dN_y}{dl} - Q_y \frac{d\alpha}{dl} = 0, \\
& \frac{dQ_y}{dl} + N_y \frac{d\alpha}{dl} - q^y = 0, \\
& A_y \frac{d^2\alpha}{dl^2} + Q_y = 0, \\
& \frac{dv}{dl} = \sin \alpha, \\
& \frac{dz}{dl} = \cos \alpha, \\
& \frac{dN_o}{ds} - Q_o \frac{d\varphi}{ds} = 0, \\
& \frac{dQ_o}{ds} + N_o \frac{d\varphi}{ds} - q^o = 0, \\
& A_o \frac{d^2\varphi}{ds^2} + Q_o = 0, \\
& \frac{dy}{ds} = \sin \varphi, \\
& \frac{dx}{ds} = \cos \varphi, \\
& \int_{l_2}^{l_3} q_{y1} \cos \alpha dl = \int_{S_2}^{S_3} q_{o1} \cos \varphi ds, \\
& \int_0^{l_1} q_y \cos \alpha dl = \int_0^{S_1} q_o \cos \varphi ds, \\
& - \int_0^{S_1} q_o \cos \varphi ds - \int_0^{S^*} q_{ro} \cos \varphi ds + \int_{S_2}^{S_3} q_{o1} \cos \varphi ds + \int_{S_4}^{S_5} q_{o1} \cos \varphi ds - \int_{S_6}^{S^*} q_o \cos \varphi ds = 0, \\
& - \int_0^{l_1} q_y \cos \alpha dl + \int_0^{l^*} q_{ry} \cos \alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_{y1} \cos \alpha dl + \int_{l_4}^{l_5} q_{y1} \cos \alpha dl - \int_{l_6}^{l^*} q_y \cos \alpha dl - 2N_{o2} \sin \theta = 0, \\
& y(q_{o1}) + v(q_{y1}) = 0,5[\eta_{oB}(q_o)d_o + \eta_{yB}(q_y)d_y] + 0,5[\eta_{oB}(q_{o1})d_o + \eta_{yB}(q_{y1})d_y]
\end{aligned} \tag{2.31}$$

где функции, определяющие действия распределенных нагрузок на отрезки нитей, определяются выражениями (2.14), (2.25).

На основе обобщенной системы уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР (2.31) может быть выполнен прочностной расчет рукава при действии ВГД. Модель будет справедлива при условии:

$$y(q_{O1}) > 0, v(q_{V1}) > 0, \quad (2.32)$$

либо равенства нулю одного из этих прогибов.

Сделаем систему (2.31) более компактной, используя преобразования [13].

Из выражения (2.20) следует:

$$Q_y = -A_y \frac{d^2 \alpha}{dl^2} \quad (2.33)$$

Подставив значение  $Q_y$  в (2.15) и (2.16), имеем:

$$\frac{dN_y}{dl} + A_y \frac{d^2 \alpha}{dl^2} \frac{d\alpha}{dl} = 0, \quad (2.34)$$

$$-A_y \frac{d^3 \alpha}{dl^3} + N_y \frac{d\alpha}{dl} - q^y = 0. \quad (2.35)$$

После преобразований уравнения (2.34) получим:

$$\frac{dN_y}{dl} = -0,5A_y \frac{d}{dl} \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \quad (2.36)$$

Интегрируя уравнение (2.36) от 0 до  $l$ , имеем:

$$N_y = -0,5A_y \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 + C_1, \quad (2.37)$$

где:  $C_1$  – постоянная интегрирования.

Определим постоянную интегрирования  $C_1$  из условия [13]:

$$l=0, \quad N_y = -0,5A_y \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \Big|_{l=0} + C_1 = No_2, \quad (2.38)$$

где  $No_2$  – натяжение нити утка в точке  $O_2$  (рисунок 2.4, б).

Из (2.38) следует:

$$C_1 = No_2 + 0,5A_y \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \Big|_{l=0} \quad (2.39)$$

Уравнение (2.37) с учетом (2.39) имеет вид [13]:

$$N_y = No_2 + 0,5A_y \left[ \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \Big|_{l=0} - \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \right]. \quad (2.40)$$

Подставим уравнение (2.40) в (2.35). После преобразования имеем [13]:

$$A_y \left\{ \frac{d^3\alpha}{dl^3} - 0,5 \left[ \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \Big|_{l=0} - \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \right] \frac{d\alpha}{dl} \right\} - No_2 \frac{d\alpha}{dl} + q^y = 0. \quad (2.41)$$

После проведенных преобразований вместо трех уравнений (2.15) (2.16) и (2.20) было получено уравнение (2.41) относительно одной переменной  $\alpha$ .

Теперь, аналогично (2.41), можно получить выражение для отрезка нити основы АТО ПГР, равновесие которого характеризуется системой (2.24):

$$A_o \left\{ \frac{d^3\varphi}{ds^3} - 0,5 \left[ \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \Big|_{s=0} - \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right] \frac{d\varphi}{ds} \right\} - No_1 \frac{d\varphi}{ds} + q^o = 0, \quad (2.42)$$

где  $No_1$  — натяжение нити основы в точке  $O_1$  в соответствии с рисунком 2.4 а.

Из полученных уравнений (2.21), (2.22) и зависимостей

$$\frac{dy}{ds} = \sin \varphi, \quad \frac{dx}{ds} = \cos \varphi \quad \text{следует:}$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.43)$$

$$\frac{dv}{dz} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.44)$$

Уравнения (2.41), (2.44) и (2.42), (2.43), входящие в (2.45), характеризуют равновесие рассмотренных отрезков соответственно уточной и основной нитей в элементе АТО ПГР переплетения саржа 1/2. Выражения (2.26), (2.27) представляют собой равенство усилий при взаимодействии основных и уточных нитей в зонах контакта, (2.28), (2.29) — уравнения

равенства нулю проекций усилий на оси  $y$ ,  $v$  соответственно для нитей основы и утка.

Уравнение (2.30) является основным геометрическим соотношением (условием совместности прогибов нитей) для АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 и связывает системы нитей утка и основы.

Учитывая выполненные преобразования, систему (2.31) представим в следующем компактном виде [169]:

$$\begin{aligned}
 & A_V \left\{ \frac{d^3 \alpha}{dl^3} - 0,5 \left[ \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \Big|_{l=0} - \left( \frac{d\alpha}{dl} \right)^2 \right] \frac{d\alpha}{dl} \right\} - N_{O_1} \frac{d\alpha}{dl} + q^y = 0, \\
 & \frac{dv}{dz} = \operatorname{tg} \alpha, \\
 & A_O \left\{ \frac{d^3 \varphi}{ds^3} - 0,5 \left[ \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \Big|_{s=0} - \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right] \frac{d\varphi}{ds} \right\} - N_{O_2} \frac{d\varphi}{ds} + q^o = 0, \\
 & \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi, \\
 & \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos \alpha dl = \int_{S_2}^{S_3} q_{O1} \cos \varphi ds, \\
 & \int_0^{l_1} q_V \cos \alpha dl = \int_0^{S_1} q_O \cos \varphi ds, \\
 & - \int_0^{S_1} q_O \cos \varphi ds - \int_0^{S^*} q_{TO} \cos \varphi ds + \int_{S_2}^{S_3} q_{O1} \cos \varphi ds + \int_{S_4}^{S_5} q_{O1} \cos \varphi ds - \int_{S_6}^{S^*} q_O \cos \varphi ds = 0, \\
 & - \int_0^{l_1} q_V \cos \alpha dl + \int_0^{l^*} q_{TV} \cos \alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos \alpha dl + \int_{l_4}^{l_5} q_{V1} \cos \alpha dl - \\
 & - \int_{l_6}^{l^*} q_V \cos \alpha dl - 2N_{O_2} \sin \theta = 0, \\
 & y(q_{O1}) + v(q_{V1}) = 0,5 [\eta_{OB}(q_O) d_O + \eta_{VB}(q_V) d_V] + 0,5 [\eta_{OB}(q_{O1}) d_{O1} + \eta_{VB}(q_{V1}) d_{V1}],
 \end{aligned} \tag{2.45}$$

где функции, определяющие действия распределенных нагрузок на отрезки нитей, определяются выражениями (2.14), (2.25).

## 2.4. Получение зависимости внутренних гидростатических давлений от параметров плосковорачиваемых гибких рукавов

Применим обобщенную систему уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР на основе переплетения саржа 1/2 (2.45) для получения зависимости внутренних гидростатических давлений от параметров ПГР.

Вследствие симметричности отрезков нитей основы и утка по нагрузке и геометрии, а также учитывая малость параметра  $\theta$  (3) ( $\sin \theta \approx \theta$ ), уравнения (2.28), (2.29) могут быть записаны в виде:

$$-2 \int_0^{s_1} q_O \cos \varphi ds - \int_{s_1}^{s^*} q_{ГО} \cos \varphi ds + 2 \int_{s_2}^{s_3} q_{О1} \cos \varphi ds = 0 \quad (2.46)$$

$$-2 \int_0^{l_1} q_V \cos \alpha dl + 2 \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos \alpha dl + \int_0^{l^*} q_{ГV} \cos \alpha dl - 2N_{O2}\theta = 0 \quad (2.47)$$

Используя соотношения (2.26), (2.27), приведем (2.46) к виду:

$$-2 \int_0^{l_1} q_V \cos \alpha dl + 2 \int_{l_2}^{l_3} q_{V1} \cos \alpha dl = \int_0^{s^*} q_{ГО} \cos \varphi ds \quad (2.48)$$

Подставив (2.48) в (2.47), представим его в виде:

$$\int_0^{l^*} q_{ГV} \cos \alpha dl + \int_0^{s^*} q_{ГО} \cos \varphi ds - 2N_{O2}\theta = 0 \quad (2.49)$$

Первый член уравнения (2.49) соответствует вертикальной равнодействующей от внутреннего давления  $q_{ГV}$ , приходящегося на отрезок уточной нити, как показано на рисунке 2.4, б. Такое давление, согласно [175, 176], равно гидростатическому давлению перекачиваемого продукта, в нашем случае интенсивности  $q_{ГV}$  умноженной на проекцию отрезка уточной нити на ось  $z$ , то есть на  $3L_O$ . Второй член представляет собой вертикальную равнодействующую от ВГД  $q_{ГО}$ , приходящегося на отрезок основной нити, как показано на рисунке 2.4, а. Такая равнодействующая равна

гидростатическому давлению перекачиваемого продукта интенсивности  $q_{ГО}$ , умноженному на проекцию отрезка основной нити на ось  $x$ , в нашем случае на  $3L_y$ . На основании этого из (2.49) с учетом (2.9), (2.10) получим уравнение:

$$0,5 \mu_{yB} p L_y 3L_o + 0,5 p L_o 3L_y - 2 N_{o2} \theta = 0 \quad (2.50)$$

Отметим, что полученное уравнение (2.50) и система уравнений (2.45) при условии, что  $\mu_{yB} = 1$ , описывают взаимодействие нитей при использовании низкомолекулярного связующего, в нашем случае — низкомолекулярного полиуретана, влиянием которого на изгиб нитей АТО и прочность ПГР можно пренебречь. Такой подход был применен в ряде исследований [156-164], где проводился прочностной расчет плоскостворачиваемых рукавов под действием ВГД, а также проектирование автомобильных шин, где было принято, что вся нагрузка воспринимается только нитями корда [177]. В этих исследованиях слои резины (латекса), низкомолекулярного полиуретана не учитывались при расчетах, так как допускалось, что их жесткость существенно ниже этого же параметра нитей АТО. Однако такое допущение имело свои недостатки. Во-первых, возрастание неточности при расчете ПГР со связующим с более высоким модулем упругости, т.к. его влиянием уже нельзя пренебречь. Во-вторых, невозможна оценка влияния характеристик связующего на прочность ПГР. Учет влияния полиуретана при расчете ПГР, чтобы избежать недостатков изложенного выше допущения. С учетом связующего имеем не чисто волокнистую структуру ППЭ АТО ПГР, а ПКМ, армированный тканью, который является сложным для расчета классом композитов в силу следующих положений [16], [178]:

1) в ПКМ, в которых ткань выступает в качестве армирования, становятся невозможны простейшие виды напряженно-деформированного состояния, а имеет место случай со сложным напряженным состоянием;

2) из-за переплетения нитей в АТО ПГР напряженное состояние и жесткость в пределах ППЭ структуры меняется от сечения к сечению, а в пределах любого рассматриваемого сечения напряженно-деформированное состояние имеет сложный характер;

3) расчет существенно усложнен тем, что механические характеристики ПКМ зависят от вида переплетения нитей в АТО ПГР, вследствие чего для каждого случая переплетения нужно выполнять свой расчет;

4) геометрическая нелинейность, свойственная гибким ПКМ, существенно влияет на его механические характеристики, поэтому ее необходимо учитывать.

Анализ публикаций [179-186] по моделированию и расчету ПКМ, армированных тканью с учетом микронеоднородности и структурной механики, в рамках которых материал считается разнородным, то есть учитываются как армирующие нити, так и матрица (связующее), позволил установить, что при выводе теоретических положений в большинстве случаев применяется внушительная система допущений со сложными математическими выкладками вследствие особой сложности проблемы расчета.

Ряд исследователей [187-189] из-за сложности теоретического описания поведения под нагрузкой ПКМ, армированных тканями структурами, пошли по пути применения метода конечных элементов (МКЭ). Такой метод имеет свои недостатки, так как уже при расчете небольшой зоны армированного тканью ПКМ исследователи сталкиваются с длительными вычислительными процедурами, даже в линейной постановке. Если возникает необходимость моделирования при помощи МКЭ нелинейного поведения ПКМ, армированных тканью, то при анализе напряженно-деформированного состояния нагруженных изделий приходится оперировать десятками, если не сотнями тысяч конечных элементов, при этом

вычислительные затраты резко возрастают, что существенно усложняет расчет.

Укажем еще один из существенных недостатков большинства перечисленных выше публикаций [179-189] по расчету напряженно-деформированного состояния ПКМ, армированных тканью, связанный с отсутствием учета основного геометрического соотношения Н.Г. Новикова для тканей полотняного переплетения. Геометрическим соотношением для тканей переплетения саржа  $1/2$  является зависимость (2.30). Для других переплетений геометрические соотношения имеют вид [13]. Важность учета геометрических соотношений объясняется тем, что они связывают деформации двух систем нитей в единое целое – однослойную ткань. Если не учитывать геометрические соотношения, то не приходится говорить о ткани, как целостном изделии, каждая система нитей (основа и уток) будут работать независимо друг от друга, что противоречит в целом представлению о ткани.

Обобщенные системы уравнений структуры армированных тканью ПКМ рассмотренные в работах [179–186], и результаты моделирования их прочностных и деформационных характеристик на основе МКЭ описанных в публикациях [187-189] не применимы для расчета ПГР, так как не охватывают все нюансы поведения этих изделий под действием ВГД.

Представленный в нашей работе альтернативный подход позволяет, при ряде допущений, получить приближенную формулу для расчета ПГР.

Как уже отмечалось выше из работы [169], «объемы полиуретана, приходящиеся на отрезки основы и утка (и содержащие эти отрезки) (рисунок 2.4, а, б), имеют форму параллелепипеда с указанными размерами. Если вычленив из этих параллелепипедов объемы, занимаемые изогнутыми нитями, то первые будут иметь искривленные полости. Картина напряженно-деформированного состояния этих параллелепипедов с искривленными полостями под нагрузкой будет иметь чрезвычайно сложный характер, даже если не принимать во внимание взаимодействие полиуретана с волокнами нитей на границе двух фракций. В [169] отмечается, что «описать

аналитическими методами напряженно-деформированное состояние этих параллелепипедов и связующего с полостями под нагрузкой, по нашему мнению, чрезвычайно трудно, если вообще возможно». Для устранения данной проблемы и с целью получения удобных формул для инженерных расчетов ПГР с учетом связующего под действием внутреннего гидравлического давления принимаем следующие допущения [169]: во всех поперечных сечениях рассматриваемых параллелепипедов из полиуретана с искривленными полостями реализуется постоянная средняя продольная сила; средняя продольная сила является равнодействующей постоянных средних растягивающих напряжений, действующих в поперечных сечениях параллелепипедов из полиуретана с искривленными полостями; площади поперечных сечений параллелепипедов из полиуретана принимаются постоянными по длине и определяются как разницы площадей поперечных сечений параллелепипедов и поперечных сечений нитей; нити имеют постоянные по длине поперечные сечения в форме эллипсов (эллипсная форма поперечных сечений нитей объясняется смятием нитей от нагрузок).

Необходимо отметить, что принятые допущения являются упрощениями, которые могут вносить определенную погрешность в расчет. Однако, учитывая второстепенную роль полиуретанового связующего по сравнению с АТО из полиэфирных нитей в обеспечении прочности ПГР, с нашей точки зрения эти допущения, не приведут к существенным неточностям в расчете. Кроме того, такой подход, в отличие от полного отказа от учёта влияния связующего, может позволить получить более точный результат, чем в модели, которая полностью игнорирует его.

Воспользуемся следующим положением из ранее проведенных нами исследований [169], а именно «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  $3L_0$  и поперечным сечением  $L_y$  на  $T$  с продольными силами под

углом  $\theta$  в краевых сечениях и нагруженного частью нагрузки от ВГД, имеет вид:

$$\sum v = -2N_{yM}\theta + q_{ГП}3L_0 = 0, \quad (2.51)$$

где  $q_{ГП} = 0,5(1 - \mu_{yB})pL_y$  - часть нагрузки от ВГД, воспринимаемая объемом полиуретана по его внутренней поверхности и отнесенная к единице его длины;

$N_{yM}$  - обусловленная действием ВГД средняя продольная сила в поперечных сечениях параллелепипеда из полиуретана, приходящегося на рассматриваемый отрезок уточины, за вычетом площади поперечного сечения последней».

Сложим левые и правые части уравнений (2.50) и (2.51), после преобразований и учета выражения (2.11), равенства  $N_{O2} = N_{yB}$ , где  $N_{yB}$  обозначает среднее натяжение в нити утка, получим [169]:

$$p = \frac{N_{yB} + N_{yM}}{L_y (R + 0,5T)}. \quad (2.52)$$

Полученная зависимость (2.52), связывает внутреннее давление  $p$  в ПГР с усредненными силами растяжения в уточной нити АТО и связующем, геометрической плотностью армирующей оболочки по утку, радиусом и толщиной стенки рукава.

## **2.5. Обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке полотняного переплетения**

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние АТО полотняного переплетения под действием ВГД (рисунок 2.6, а, б).

Нелинейная обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в АТО полотняного переплетения при действии ВГД перекачиваемого

продукта близка по структуре к обобщенной системе уравнений (2.45), но будет иметь следующие отличия.

Во-первых, функции распределенных нагрузок  $q_o$ ,  $q_y$ , приложенные к отрезкам основных и уточных нитей, примут вид:

$$q_o = q_o^* [1 - H(s - s_1) + H(s - s_4)] - q_o [H(s - s_2) - H(s - s_3)] + q_{го}, \quad (2.53)$$

$$q_y = q_y [1 - H(l - l_1) + H(l - l_4)] - q_y^* [H(l - l_2) - H(l - l_3)] - q_{гy}. \quad (2.54)$$

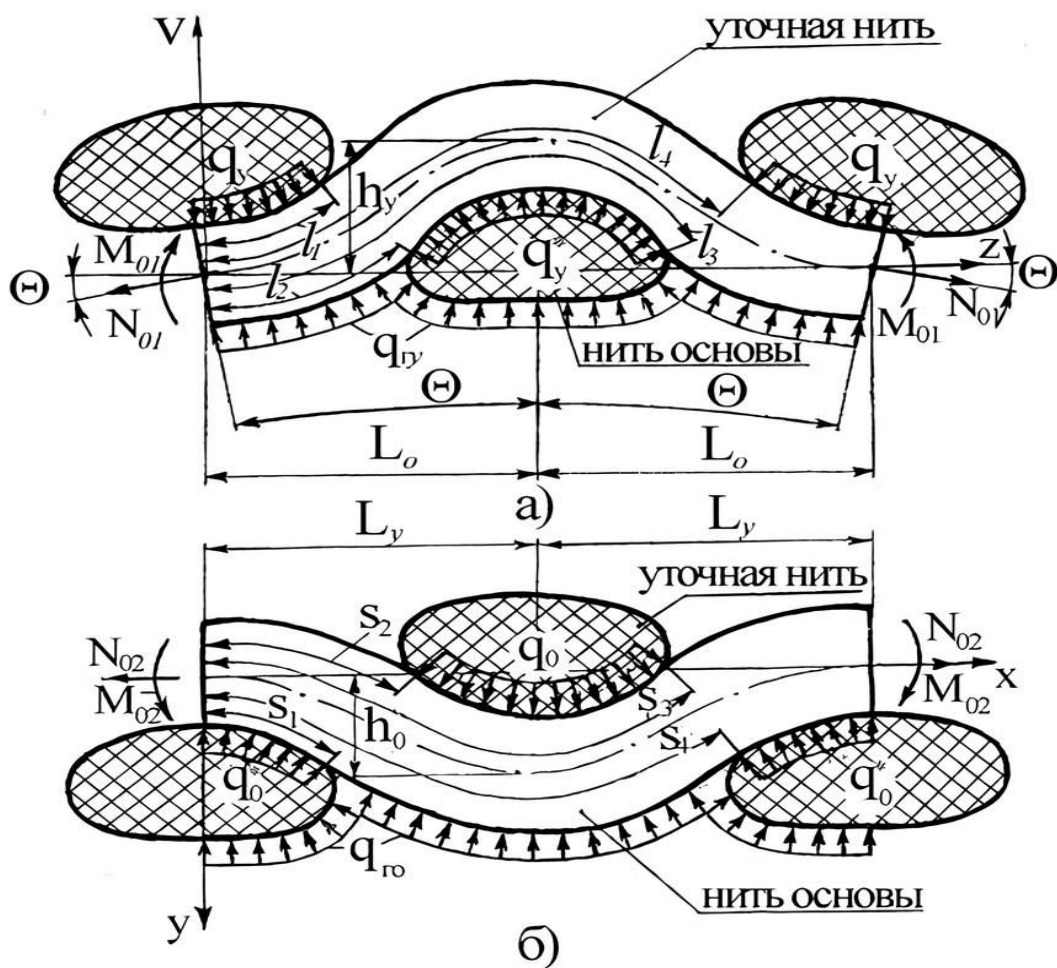


Рисунок 2.6 – Схема равновесия отрезков уточной (а) и основной (б) нитей АТО полотняного переплетения

Во-вторых, зависимость угла  $\Theta$  (рисунок 2.6, а) будет другой. Вместо соотношения (2.11), получим:

$$\Theta = \frac{L_o}{R + 0,5T}. \quad (2.55)$$

В-третьих, вместо уравнений (2.26)-(2.29) имеем:

$$\int_{l_2}^{l_3} q_Y^* \cos \alpha dl = \int_{S_2}^{S_3} q_O \cos \varphi ds, \quad (2.56)$$

$$\int_0^{l_1} q_Y \cos \alpha dl = \int_0^{S_1} q_0^* \cos \varphi ds, \quad (2.57)$$

$$-2 \int_0^{S_1} q_O^* \cos \varphi ds - \int_0^{S^*} q_{GO} \cos \varphi ds + \int_{S_2}^{S_3} q_O \cos \varphi ds = 0, \quad (2.58)$$

$$\int_0^{l^*} q_{GY} \cos \alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_Y^* \cos \alpha da - 2 \int_0^{l_1} q_Y \cos \alpha dl - 2N_{O1} \sin \Theta = 0 \quad (2.59)$$

В-четвертых, вместо геометрического соотношения (2.30), справедливого для переплетения саржа 1/2, будем использовать соотношение Н.Г. Новикова для полотняного переплетения:

$$h_O + h_Y = d_O \eta_{OB} + d_Y \eta_{YB}. \quad (2.60)$$

Вместо уравнения (2.51) имеем:

$$\sum v = -2N_{YM} \sin \Theta + q_{ГП} 2L_O = 0, \quad (2.61)$$

где

$$q_{ГП} = 0,5(1 - \mu_{YB}) pL_Y. \quad (2.62)$$

Применив в преобразованиях уравнения (2.56), (2.57), приведем уравнение (2.58) к виду:

$$-2 \int_0^{l_1} q_Y \cos \alpha dl + \int_{l_2}^{l_3} q_Y^* \cos \alpha dl = \int_0^{S^*} q_{GO} \cos \varphi ds. \quad (2.63)$$

Подставив (2.63) в (2.59) для малых углов  $\sin \Theta \approx \Theta$ , имеем:

$$\int_0^{l^*} q_{ГV} \cos \alpha dl + \int_0^{s^*} q_{ГО} \cos \varphi ds - 2N_{O1} \Theta = 0. \quad (2.64)$$

Первый и второй члены левой части уравнения (2.64) представляют собой вертикальные равнодействующие, от внутренних давлений  $q_{ГV}$ ,  $q_{ГО}$ , приходящиеся на отрезки нитей. Данные равнодействующие равны гидростатическим давлениям перекачиваемого продукта на проекции этих отрезков на оси  $z$  и  $x$  (рисунок 2.6, а,б), с учетом (2.9), (2.10) имеем:

$$0,5 \mu_{VB} p L_V 2L_O + 0,5 p L_O 2L_V - 2N_{O1} \Theta = 0. \quad (2.65)$$

Складывая левые и правые части уравнений (2.65) и (2.61) с учетом (2.62), (2.55), при условии  $N_{O1} = N_{VB}$  (где  $N_{VB}$  – среднее натяжение в уточной нити), после преобразований имеем формулу (2.52).

Итак, для полотняного переплетения и переплетения саржа 1/2 получаем одну и ту же зависимость (2.52).

## **2.6. Зависимости для разрывных давлений и условия прочности плоскосворачиваемых гибких рукавов**

С целью преобразования формулы (2.52) получим зависимость между силой  $N_{UM}$  и натяжением в уточной нити  $N_{VB}$ . Под  $N_{UM}$  здесь, как и ранее, понимается обусловленная действием внутреннего давления средняя продольная сила в поперечных сечениях параллелепипеда из полиуретана, приходящегося на рассматриваемый отрезок уточины, за вычетом площади поперечного сечения этой нити [190].

Рассмотрим отрезок нити утка со слоем связующего (полиуретана) между осью  $v$  и осью симметрии до и после деформации под действием

растягивающих сил, обусловленных действием ВГД (рисунок 2.7, а) [191]. Этот отрезок соответствует половине отрезка уточной нити (рисунок 2.4, б).

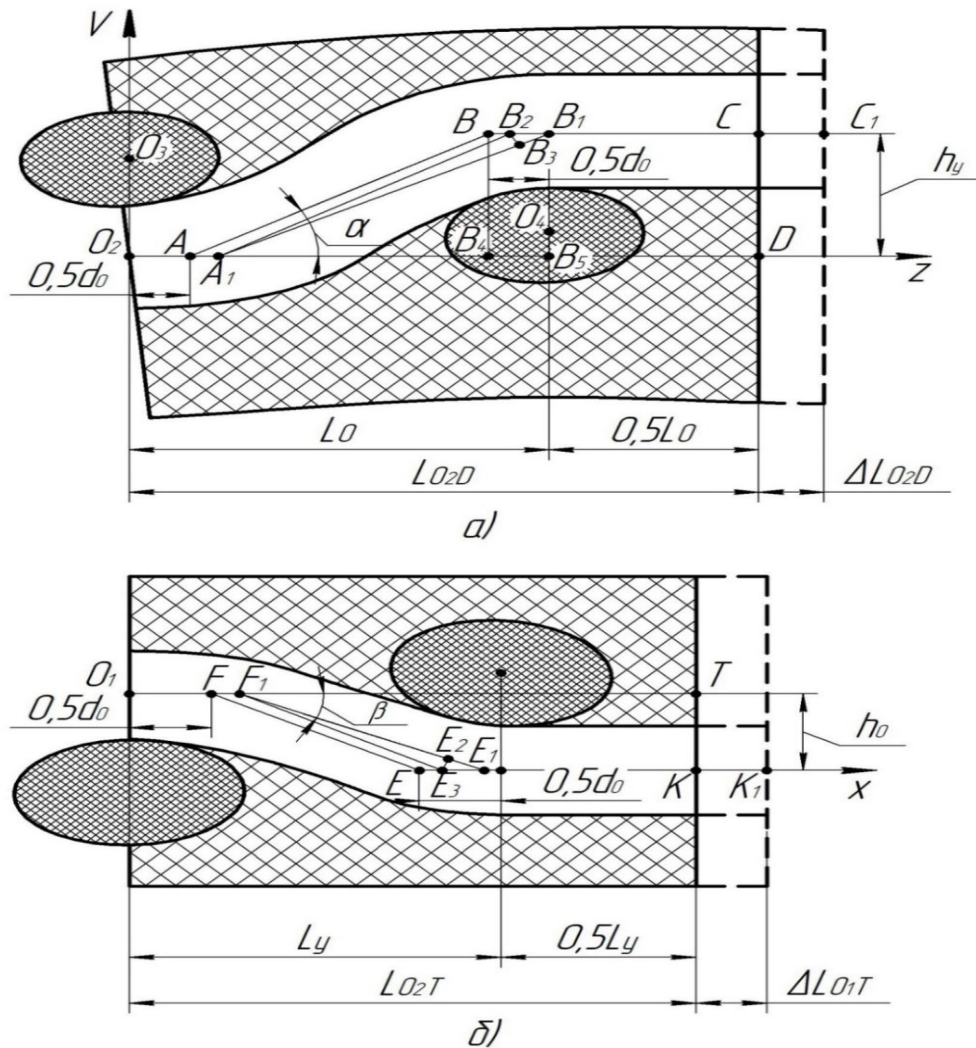


Рисунок 2.7 – Отрезки уточной (а) и основной (б) нитей со слоями полиуретана до и после деформирования

Деформированную ось отрезка уточной нити аппроксимируем ломаной  $O_2ABC$  (рисунок 2.7, а). Считаем, что  $O_2A=B_4B_5=0,5d_0$ ,  $O_3$ ,  $O_4$  - центры поперечных сечений нитей основы.

Слой связующего (полиуретана) с отрезком нити утка будет находиться в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Но, согласно принятым ранее упрощающим допущениям, все сводится к учету только растягивающих усилий в полиуретане и нити. Далее, считая, что

растяжение нити и полиуретана (связующего) подчиняется закону Гука, рассмотрим деформирование системы, пренебрегая при этом изменением ее поперечного сечения, обусловленным эффектом Пуассона.

В ранее проведенных исследованиях [169] отмечается, «что вдоль оси уточной нити действует постоянная по величине средняя продольная сила  $N_{yB}$ . Под действием этой силы уточина продеформируется, в результате чего ломаная  $O_2ABC$  займет положение  $O_2A_1B_1C_1$ , при этом:

1) отрезок нити  $O_2A$  получит удлинение  $AA_1$ ;

2) наклонный отрезок нити утка  $AB$  после деформирования займет новое положение  $A_1B_1$  и получит удлинение  $B_1B_3$ , которому будет соответствовать по оси  $z$  удлинение  $B_1B_2$ ; при этом  $B_1B_2$  будет также удлинением связующего на участке  $AB_4$  длиной  $L_0 - d_0$  (рисунок 2.7, а), где  $L_0$ ,  $d_0$  - соответственно геометрическая плотность ткани армирующей оболочки по основе и диаметр основной нити;

3) отрезок  $BC$  удлинится и займет новое положение  $B_1C_1$ ».

Полное абсолютное удлинение отрезка уточной нити по оси  $z$  составит [191]:

$$\Delta l_{O_2ABC} = \Delta l_{O_2A} + \Delta l_{AB}^{np} + \Delta l_{BC}, \quad (2.66)$$

где  $\Delta l_{O_2A}$ ,  $\Delta l_{BC}$  – абсолютные удлинения горизонтальных отрезков  $O_2A$  и  $BC$  уточин;

$\Delta l_{AB}^{np}$  – приращение по оси  $z$  абсолютного удлинения наклонного отрезка  $AB$ .

Рассматривая треугольник  $B_1B_2B_3$  (рисунок 2.7, а), если пренебречь небольшим изменением угла  $\alpha$ , выведем приращение по оси  $z$  абсолютного удлинения наклонного участка  $AB$  [191]:

$$\Delta l_{AB}^{np} = B_1B_2 = \frac{B_1B_3}{\cos \alpha} = \frac{\Delta l_{AB}}{\cos \alpha}, \quad (2.67)$$

где  $\Delta l_{AB}$  - абсолютное удлинение наклонного участка  $AB$ .

Для  $\cos \alpha$  получим:

$$\cos \alpha = \frac{L_o - d_o}{\sqrt{(L_o - d_o)^2 + h_y^2}}. \quad (2.68)$$

С учетом (2.68) зависимость (2.67) будет иметь вид [191]:

$$\Delta l_{AB}^{np} = \frac{\Delta l_{AB} \sqrt{(L_o - d_o)^2 + h_y^2}}{L_o - d_o}, \quad (2.69)$$

где  $h_y$  – высота или прогиб волны изгиба нити утка (рисунок 3.1, а).

Подставив (2.69) в (2.66) и выражая абсолютные удлинения на каждом отрезке через усредненное натяжение в нити утка  $N_{yB}$ , учитывая закон Гука, после преобразований получим формулу для абсолютного удлинения отрезка уточной нити по оси  $z$  [191]:

$$\begin{aligned} \Delta l_{O_2ABC} &= \Delta l_{O_2A} + \frac{\Delta l_{AB} \sqrt{(L_o - d_o)^2 + h_y^2}}{L_o - d_o} + \Delta l_{BC} = \frac{N_{yB} l_{O_2A}}{E_{yB} A_{yB}} + \frac{N_{yB} [(L_o - d_o)^2 + h_y^2]}{E_{yB} A_{yB} (L_o - d_o)} + \frac{N_{yB} l_{BC}}{E_{yB} A_{yB}} = \\ &= \frac{N_{yB} 0,5 d_o}{E_{yB} A_{yB}} + \frac{N_{yB} [(L_o - d_o)^2 + h_y^2]}{E_{yB} A_{yB} (L_o - d_o)} + \frac{N_{yB} 0,5 (d_o + L_o)}{E_{yB} A_{yB}} = \frac{1,5 L_o N_{yB}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y), \end{aligned} \quad (2.70)$$

где  $E_{yB}$  – модуль упругости уточной нити при растяжении;

$A_{yB}$  – площадь поперечного сечения уточной нити.

$$C_y = \frac{h_y^2}{1,5 L_o (L_o - d_o)}. \quad (2.71)$$

Принимая допущение, что нити имеют срез в форме эллипса, получим, что площадь поперечного сечения уточной нити будет [191]:

$$A_{yB} = 0,25 \pi \eta_{yT} \eta_{yB} d_y^2, \quad (2.72)$$

где  $d_y$  – диаметр поперечного сечения уточной нити;

$\eta_{yT}$ ,  $\eta_{yB}$  – соответственно коэффициенты горизонтального и вертикального смятия поперечных сечений уточной нити.

Из (2.70) выразим абсолютное удлинение, приходящееся на геометрическую плотность ткани армирующей оболочки по основе  $L_O$  [191]:

$$\Delta L_O = \frac{\Delta l_{O_2ABC}}{1,5} = \frac{L_O N_{yB}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y) . \quad (2.73)$$

С обратной стороны, для абсолютного удлинения связующего (полиуретана) на участке  $1,5 L_O$  имеем [191]:

$$\Delta L_{O_2D} = \frac{1,5 L_O N_{yM}}{E_{yM} A_{yM}} , \quad (2.74)$$

где  $A_{yM}$ ,  $E_M$  – соответственно площадь поперечного сечения полиуретана, приходящегося на отрезок утка и модуль упругости при растяжении.

Площадь поперечного сечения связующего (полиуретана) -  $A_{yM}$ , приходящегося на отрезок уточной нити, определим по формуле [191]:

$$A_{yM} = L_y T - 0,25 \pi \eta_{yT} \eta_{yB} d_y^2 . \quad (2.75)$$

Приравняем правые части (2.70) и (2.74), зная, что абсолютные удлинения нити утка и связующего (полиуретана) в краевом сечении равны, после преобразований имеем [191]:

$$\frac{N_{yM}}{N_{yB}} = \frac{E_M A_{yM}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y) . \quad (2.76)$$

Исследуя отрезок нити основы со слоем связующего (полиуретана) между осью  $y$  и осью симметрии (рисунок 2.7, б) до и после деформирования под действием растягивающих сил и применяя такие же суждения и выкладки, получаем зависимости для отрезка нити основы [191]:

для абсолютного удлинения отрезка основной нити, приходящегося на геометрическую плотность ткани армирующей оболочки по утку  $L_y$ :

$$\Delta L_y = \frac{L_y N_{OB}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o), \quad (2.77)$$

для зависимости между усредненной продольной силой в слое связующего (полиуретана)  $N_{OM}$  от усредненного натяжения в нити основы  $N_{OB}$

$$\frac{N_{OM}}{N_{OB}} = \frac{E_M A_{OM}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o), \quad (2.78)$$

где  $\Delta L_y$  – приращение геометрической плотности ткани по утку  $L_y$  АТО ПГР, обусловленное удлинением нити основы от действия ВГД;

$A_{OB}, E_{OB}$ , – соответственно площадь поперечного сечения нити основы и модуль упругости при растяжении.

$$C_o = \frac{h_o^2}{1,5L_y(L_y - d_y)}. \quad (2.79)$$

Для площади  $A_{OB}$  из-за принятого допущения о форме ее сечения в форме эллипса получим [191]:

$$A_{OB} = 0,25 \pi \eta_{OG} \eta_{OB} d_o^2, \quad (2.80)$$

где  $d_o$  - диаметр поперечного сечения основной нити;

$\eta_{OB}, \eta_{OG}$ , - коэффициенты вертикального и горизонтального смятия поперечных сечений нити основы.

Выражение для определения площади поперечного сечения связующего (полиуретана)  $A_{OM}$ , приходящегося на отрезок основной нити, будет иметь вид [191]:

$$A_{OM} = L_o T - 0,25 \pi \eta_{OG} \eta_{OB} d_o^2. \quad (2.81)$$

Выразим из уравнения (2.76)  $N_{UM}$  и подставим итог в уравнение (2.52), после соответствующих преобразований имеем уравнение [191]:

$$p = \frac{N_{yB} [E_{yB} A_{yB} + E_M A_{yM} (1 + C_y)]}{L_y (R + 0,5T) E_{yB} A_{yB}} . \quad (2.82)$$

Следует отметить, что зависимость (2.82) получена при постоянных значениях  $L_y$  и  $R$ . Но как показывает практика эксплуатации и испытаний ПГР и близких к ним по структуре пожарных напорных рукавов, уже при рабочих внутренних давлениях наблюдается заметное увеличение радиусов и длины рукавов. ГОСТ Р 51049-97 (РФ) [192] допускает увеличение радиусов не более чем на 10%, а увеличение длины рукава не более чем на 5%.

Разрывные внутренние давления в ПГР превышают рабочие в 2-4 раза. Поэтому они могут вызвать еще более существенное увеличение радиусов и длин, а, следовательно, и геометрической плотности ткани армирующей оболочки рукавов. Пренебрегая увеличением этих параметров, заведомо допускаем неточность в расчетах. Преобразуем (2.82) с учетом увеличения  $L_y$  и  $R$  от действия ВГД [191].

Запишем радиус окружности, совпадающей со срединной линией толщины стенки ПГР, в виде  $R_{cp.} = R + 0,5T$ . Уточним, что на срединной линии располагается деформированная нить утка, отрезок которой представлен на рисунке 2.4, б. Длина этой окружности  $2\pi R_{cp.}$  до нагружения за счет действия ВГД увеличится до значения [191]:

$$S_{разр.} = 2\pi (R_{cp.} + \Delta R_{cp.}) , \quad (2.83)$$

где  $\Delta R_{cp.}$  – является приращением радиуса окружности, который совпадает со срединной линией толщины стенки ПГР, и обусловлено действием ВГД.

Действие ВГД на ПГР вызывает появление больших растягивающих сил и изгибов в нитях, сильного смятия нитей в радиальном направлении в зонах контакта. Поэтому длина окружности, с другой стороны, будет зависеть от деформации точной нити утка при растяжении [191]:

$$S_{разр.} = (1 + \varepsilon_y) L_0 n_0, \quad (2.84)$$

где  $\varepsilon_y$  является деформацией от растяжения нити утка, приходящейся на геометрическую плотность ткани армирующей оболочки по основе, для которой, учитывая уравнение (2.73), имеем:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta L_0}{L_0} = \frac{N_{yB}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y), \quad (2.85)$$

$n_0$  – количество основных нитей в ПГР, для которого получим:

$$n_0 = \frac{2\pi R_{cp.}}{L_0}. \quad (2.86)$$

Приравнивая правые части уравнений (2.83) и (2.84) и учитывая выражения (2.85) и (2.86) для радиуса срединной линии толщины стенки ПГР при действии ВГД, имеем [191]:

$$R_{cp.} + \Delta R_{cp.} = \left[ 1 + \frac{N_{yB}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y) \right] (R + 0,5T). \quad (2.87)$$

Приращение геометрической плотности ткани армирующей оболочки по утку  $\Delta L_y$  АТО ПГР, вызванное действием ВГД, происходит за счет деформации нити основы при растяжении.

$$L_y + \Delta L_y = (1 + \varepsilon_0) L_y, \quad (2.88)$$

где  $\varepsilon_0$  – деформация от растяжения нити основы, приходящаяся на геометрическую плотность ткани армирующей оболочки по утку, для которой с учетом выражения (2.77) получим:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta L_y}{L_y} = \frac{N_{oB}}{E_{oB} A_{oB}} (1 + C_o). \quad (2.89)$$

Учитывая полученное выражение (2.89), уравнение (2.88) примет вид:

$$L_{y.} + \Delta L_y = \left[ 1 + \frac{N_{OB}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o) \right] L_y . \quad (2.90)$$

Подставив в уравнение (2.82) вместо  $R_{cp.} = R + 0,5T$  и  $L_y$  значения этих величин с учетом приращений по выражениям (2.87) и (2.90), обусловленных действием ВГД, имеем [191]:

$$p = \frac{N_{yB} [E_{yB} A_{yB} + E_M A_{yM} (1 + C_y)]}{\left[ 1 + \frac{N_{OB}}{E_{OB} A_{OB}} (1 + C_o) \right] L_y \left[ 1 + \frac{N_{yB}}{E_{yB} A_{yB}} (1 + C_y) \right] (R + 0,5T) E_{yB} A_{yB}} . \quad (2.91)$$

При действии ВГД интенсивностью  $p$  в ПГР при перекрытии потока жидкости запорной арматурой каждая основная нить и слой связующего (полиуретана), приходящийся на эту нить, воспримут растягивающие силы от действующей на рукав продольного усилия  $\pi R^2 p$ :

$$\pi R^2 p = n_o (N_{OB} + N_{OM}) . \quad (2.92)$$

С учетом (2.78) и (2.86) зависимость (2.92) покажем в виде [191]:

$$p = \frac{2(R + 0,5T) [E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_o)] N_{OB}}{L_o R^2 E_{OB} A_{OB}} . \quad (2.93)$$

Из (2.93) следует условие прочности ПГР по нитям основы при действии внутреннего гидростатического давления [191]:

$$N_{OB} = \frac{p L_o R^2 E_{OB} A_{OB}}{2(R + 0,5T) [E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_o)]} \leq N_{разр.}^{OB} , \quad (2.94)$$

где  $N_{разр.}^{OB}$  - усилие при разрыве нити основы.

Подставив (2.94) в (2.91) и преобразовав, получим зависимость, связывающую натяжение в нити утка с внутренним гидростатическим давлением  $p$  и другими характеристиками АТО ПГР. Давление  $p$  в нашем

случае для недопущения разрыва рукава не должно превышать усилия при разрыве уточной нити  $N^{yB}_{разр.}$  [191]:

$$N_{yB} = \frac{p \left\{ L_y E_{yB} A_{yB} \left[ 2(R + 0,5T)B + L_o R^2 (1 + C_o) \right] \right\}}{2BD - pL_y (1 + C_y) \left[ 2(R + 0,5T)B + pL_o R^2 (1 + C_o) \right]} \leq N^{yB}_{разр.} \quad (2.95)$$

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

Уравнение (2.93) является условием прочности ПГР по нитям утка для недопущения его разрыва от действия ВГД.

Обозначим внутреннее гидростатическое давление в ПГР, при котором натяжение в нити утка становится равным разрывному ( $N_{yB} = N^{yB}_{разр.}$ ) и происходит разрушение рукава от разрыва нитей утка, через  $p^y_{разр.}$  и назовем его разрывным давлением. Подставляя в (2.94)  $p = p^y_{разр.}$ , получаем формулу для усилия натяжения нити основы в момент разрыва нити утка [191]:

$$N_{OB} = \frac{p^y_{разр.} L_o R^2 E_{OB} A_{OB}}{2(R + 0,5T) \left[ E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_o) \right]}. \quad (2.96)$$

Подставим (2.96) в уравнение (2.91) и выполним в нем замены  $N_{yB} = N^{yB}_{разр.}$ ,  $p = p^y_{разр.}$ . Учитывая, что  $\frac{N^{yB}_{разр.}}{E_{yB} A_{yB}} = \varepsilon^y_{разр.}$  является деформацией при разрыве нити утка, после преобразований имеем квадратное уравнение относительно  $p^y_{разр.}$  [191]:

$$a(p^y_{разр.})^2 + b(p^y_{разр.}) + c = 0, \quad (2.97)$$

для положительного корня которого получим:

$$p^y_{разр.} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.98)$$

где

$$a = \frac{L_O R^2 (1 + C_O) L_Y \left[ 1 + \varepsilon_{\text{разр.}}^Y (1 + C_Y) \right] E_{YB} A_{YB}}{2 \left[ E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O) \right]}, \quad (2.99)$$

$$b = L_Y \left[ 1 + \varepsilon_{\text{разр.}}^Y (1 + C_Y) \right] (R + 0,5T) E_{YB} A_{YB}, \quad (2.100)$$

$$c = -N_{\text{разр.}}^{YB} \left[ E_{YB} A_{YB} + E_M A_{YM} (1 + C_Y) \right]. \quad (2.101)$$

Аналогично обозначим ВГД в ПГР, при котором натяжение в нити основы становится равным разрывному ( $N_{OB} = N_{\text{разр.}}^{OB}$ ) и имеет место разрушение рукава от разрыва основных нитей через  $p_{\text{разр.}}^O$ .

Подставив в (2.93)  $N_{OB} = N_{\text{разр.}}^{OB}$ ,  $p = p_{\text{разр.}}^O$ , получаем выражение для разрывного ВГД, обусловленного разрывом нитей основы [191]:

$$p_{\text{разр.}}^O = \frac{2(R + 0,5T) \left[ E_{OB} A_{OB} + E_M A_{OM} (1 + C_O) \right] N_{\text{разр.}}^{OB}}{L_O R^2 E_{OB} A_{OB}}. \quad (2.102)$$

Разрывные давления, обозначаемые как  $p_{\text{разр.}}^Y$  (2.98) и  $p_{\text{разр.}}^O$  (2.102), являются важными параметрами, определяющими запас прочности ПГР при действии на них ВГД. Эти параметры регламентируются ГОСТами и технические условия, по которым происходит проектирование таких изделий.

При расчете и проектировании ПГР необходимо определять два типа разрывных давлений:  $p_{\text{разр.}}^Y$ , характеризующее прочность уточных нитей, и  $p_{\text{разр.}}^O$ , которое характеризует прочность нитей основы. Важно отметить, что для определения типа разрушения рукава стоит ориентироваться на наименьшее из этих двух значений. Например, если давление  $p_{\text{разр.}}^Y < p_{\text{разр.}}^O$ , то ПГР разрушится именно из-за разрыва нитей утка, что является более распространенным случаем на практике. Для обеспечения долговечной и надежной работы ПГР требуется, чтобы рабочие внутренние давления были в 2-4 раза ниже разрывных давлений. Согласно ГОСТ Р 51049-97 [192], для

напорных пожарных рукавов следует устанавливать двойное превышение разрывные давления над рабочими, а для ПГР этот показатель должен быть не менее четырех [193]. Однако, на практике такое соотношение может быть нарушено по нескольким причинам [191]:

1) при проектировании ПГР либо будут заложены уточные волокна недостаточной прочности, либо будет применена АТО с существенно большим значением геометрической плотности по утку  $L_y$ , что согласно (2.91) снижает  $p_{разр.}^y$  (расчеты показывают, что в большинстве случаев  $p_{разр.}^y < p_{разр.}^o$ , и ПГР разрушается от разрыва нитей утка);

2) при проектировании ПГР заложено недостаточное число основных нитей  $n_o$ , что согласно (2.86) приведет к увеличению геометрической плотности ткани армирующей оболочки по основе  $L_o$ , а это, в свою очередь, согласно (2.102) снизит величину  $p_{разр.}^o$ ;

3) если в качестве нитей основы выбраны нити с низкой разрывной нагрузкой, что согласно зависимости (2.102) также вызовет снижение  $p_{разр.}^o$ ; возможен случай, когда  $p_{разр.}^o < p_{разр.}^y$ , и разрыв ПГР произойдет из-за разрушения нитей основы (в этом случае необходимо, чтобы рабочие внутренние давления в рукавах были в 2-4 раза ниже разрывных).

Полученные условия прочности по основным (2.94) и уточным (2.95) нитям АТО для недопущения разрыва ПГР от действия внутреннего гидростатического давления перекачиваемого продукта, а также зависимости (2.98), (2.102) для расчета разрывных внутренних давлений положены нами в основу разработки методики расчета и проектирования ПГР.

Полученные условия прочности и зависимости будут справедливы как для расчета ПГР с переплетением саржа 1/2, так и для схожих с ними по конструкции ПНР, в основе которых в ряде случаев применяется АТО полотняного переплетения, которая покрыта слоями резины (латекса). При этом полученная зависимость (2.85) остается такой же в случае ПНР. Основное отличие заключается только в материале связующего, резина

(латекс) вместо полиуретана. Поэтому выразим формулы для расчета параметров  $C_y$  и  $C_o$  в АТО с полотняным переплетением [191]:

$$C_y = \frac{h_y^2}{L_o(L_o - d_o)}, \quad (2.103)$$

$$C_o = \frac{h_o^2}{L_y(L_y - d_y)}. \quad (2.104)$$

Уравнения (2.103) и (2.104) для определения  $C_y$  и  $C_o$  были получены при подходе, который был использован при получении формулы (2.70), но с учетом правок, характеризующих полотняное переплетение.

### Выводы по главе

1. Используя нелинейную теорию изгиба гибких нитей и принятую в настоящей работе систему допущений применительно к нитям и материалу, из которого они состоят, получили обобщенную систему уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР переплетения саржа 1/2 при действии внутреннего гидростатического давления перекачиваемого продукта.

2. Полученная обобщенная система уравнений взаимодействия нитей в АТО ПГР переплетения саржа 1/2 в случае отсутствия внутреннего гидростатического давления перекачиваемого продукта ( $q_{ГУ}=q_{ГУ}=0$ ) может быть использована для определения таких параметров строения ткани армирующей тканой оболочки, как: высоты изгиба основных и уточных нитей и их отношение, уработки нитей, длины нитей, формы осевых линий нитей в ткани, толщины и наполнения ткани волокнистым материалом, силы давления между нитями и т. д.

3. Получена зависимость разрывного давления от средних сил растяжения в нитях АТО и полиуретане (связующем), геометрической плотности ткани армирующей оболочки, радиуса и толщины стенки ПГР.

4. Показано, что для АТО ПГР полотняного переплетения и переплетения саржа  $1/2$  справедлива одна и та же зависимость, связывающая разрывные давления с параметрами армирующей тканой оболочки. Различными являются лишь отдельные параметры, входящими в данную зависимость.

5. При расчете и проектировании ПГР необходимо определять два вида разрывных давлений: разрывные давления, обусловленные разрушением как нитей утка, так и основы; получены зависимости для каждого вида разрывных давлений; наименьшее из этих двух разрывных давлений является давлением, при котором имеет место разрушение ПГР.

6. Получены условия прочности по нитям основы и утка АТО для недопущения разрыва ПГР от действия внутреннего гидростатического давления перекачиваемого продукта; данные зависимости для расчета внутренних разрывных давлений и условия прочности являются основой для методики расчета и проектирования ПГР и ПНР.

### **ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЧНОСТНОГО РАСЧЕТА ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ ГИБКИХ РУКАВОВ, ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ**

#### **3.1. Требования к плоскосворачиваемым гибким рукавам в соответствии с ГОСТ Р 58714-2019**

ГОСТ Р 58714-2019 – это основной документ, устанавливающий жесткие рамки технических требований и методик испытаний для всех типов ПГР, проектируемых, изготавливаемых и эксплуатируемых на территории Российской Федерации. Этот стандарт определяет практически все ключевые технические характеристики, которым должны соответствовать производимые ПГР. К ним относятся, в первую очередь, геометрические параметры: длина рукава, толщина его стенки, а также внутренний (проходной) диаметр, который, как и другие параметры, зависит от типа и назначения ПГР.

Среди таких показателей особое значение имеет рабочее давление – максимальное давление, при котором рукав может непрерывно функционировать в течение заданного периода времени, не теряя своих эксплуатационных свойств. Важным является разрывное давление, при котором происходит разрушение рукава. Этот параметр является одним из основополагающих при оценке безопасности использования ПГР. ГОСТ Р 58714-2019 устанавливает минимально допустимые значения разрывного давления для каждого типа и диаметра ПГР, что обеспечивает повышенный уровень безопасности.

Помимо прочностных характеристик, ГОСТ также регулирует эластичные свойства рукавов и учитывает изменение внутреннего диаметра рукава под действием давления. Стандарт содержит требования к стойкости рукавов к абразивному износу, что важно для обеспечения долговечности в

условиях интенсивной эксплуатации. Учитывается масса рукава на единицу длины, что является важным параметром при эксплуатации и транспортировке. Температура эксплуатации ППР также регулируется этим стандартом.

Все изготовленные на территории РФ плоскостворачиваемые гибкие рукава проходят в условиях производства каждой партии процедуру испытания на разрыв гидростатическим давлением в соответствии с ГОСТ Р 58714-2019. Подготовка к испытаниям проходит в несколько этапов: из готовой партии выбираются образцы для испытаний, количество которых определяется спецификациями изготовителя или условиями договора поставки, перед проведением испытаний образцы промывают и осматривают на предмет наличия визуальных дефектов, деформаций или посторонних включений, для измерения параметров используется оборудование, соответствующее стандартам точности измерений.

Затем проходит сам процесс испытания, имеющий следующий порядок: испытываемый образец рукава с заглушками помещается в специальную установку, позволяющую создать внутреннее давление путем подачи рабочей жидкости (воды, масла и др.), образец наполняется жидкостью, причем скорость заполнения контролируется так, чтобы исключить образование воздушных пробок, постепенно увеличивают давление внутри элемента до момента разрыва. Процесс ведется медленно, позволяя выявить поведение материала при нагрузке, зафиксированное максимальное давление, при котором произошел разрыв, заносится в отчет испытаний.

По завершении испытаний проводят оценку полученных данных. Рассчитывают среднее арифметическое значений разрывного давления для всех образцов, устанавливают пределы допуска, сравнивая полученные результаты с заявленными характеристиками, составляют акт испытаний, содержащий подробную информацию о процессе и результатах эксперимента.

Если среднее значение разрывного давления превышает номинальное значение, указанное в технической документации, элементы признаются соответствующими требованиям стандарта. В противном случае продукция считается дефектной и требует дополнительного анализа или доработки.

### **3.2. Объекты исследования и анализ исходных данных для прочностного расчета плоскостворачиваемых гибких рукавов**

Для подтверждения достоверности полученных зависимостей по разрывным давлениям в случае разрушения уточных (2.98) и основных (2.102) нитей были получены исходные данные от производителей, которые представлены в таблице А.1 приложения А для пяти образцов ПГР с соответствующими внутренними номинальными диаметрами, далее DN [194]:

- 1) ПГР DN=100 мм производства АО «Ивхимпром» (г. Иваново);
- 2) три образца ПГР производителя - ООО «Балтикфлекс», г. Санкт-Петербург диаметром DN = 150 мм и один рукав диаметром DN = 400 мм.

Зависимости (2.98) и (2.102) также могут быть использованы при расчете разрывных гидростатических давлений в пожарных напорных рукавах, изготовленных на основе АТО полотняного переплетения. Для подтверждения этого утверждения были получены исходные данные для пяти ПНР с диаметрами DN = 150 мм, DN = 89 мм, DN = 77 мм, DN = 66 мм, DN = 51 мм под рабочее давление 1,6 Мпа от производителя ПО «Берег» (Московская область, пос. Большие Дворы) [194].

Также были получены образцы нитей и отрезки рукавов для экспериментального исследования ряда параметров (диаметров нитей, модуля упругости связующего, усилий разрыва нитей и т.д.).

С целью подтверждения достоверности предоставленных производителями данных была поставлена задача экспериментального

определения усилий разрыва уточной и основной нити выборочно для нескольких образцов. Необходимые технологические параметры круглоткацкого станка, такие как расстояния между осями соседних нитей основы и утка, после замеров полностью совпадают с этими же параметрами в опытных образцах рукавов.

### **3.3. Экспериментальное определение модуля упругости полиуретана**

Так как полученные зависимости учитывают влияние связующего на прочность ПГР, то необходимо определить для расчета разрывных давлений такую характеристику полиуретана, как модуль его упругости при растяжении, и исследовать влияние полиуретана на прочностные показатели рукавов.

Полиуретан характеризуется высокими физико-механическими свойствами [195] и имеет большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, сопротивление раздиру, маслобензостойкость, кислотостойкость. Применение данного материала в качестве связующего обеспечивает работоспособность ПГР при температурах от  $-60$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . Свойства полиуретана, согласно исследованиям [146-148], напрямую зависят от температуры его применения, поэтому для полноценной картины влияния связующего на прочность ПГР необходимо исследовать зависимость модуля упругости полиуретана от температуры эксплуатации рукавов.

Для прочностного расчета ПГР с учетом влияния связующего по зависимостям (2.98)-(2.102) определим - модуль упругости, полиуретана для имеющихся образцов рукавов. Этот параметр определялся по ГОСТ 9550-81 Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе [196] и ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Методы испытаний на растяжение [197]. Для определения данного модуля в соответствии с

указанными стандартами, на внешней поверхности каждого ПГР диаметром 100 мм и 150 мм вырезались по шесть полосок полиуретана длиной 250 мм и шириной 25 мм.

В ходе испытания полоски полиуретана устанавливались в испытательную машину ZY6010H (производства КНР) так, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали с линией, соединяющей точки крепления зажимов на машине. Машина для определения физико-механических свойств ПГР с полосками полиуретана показана на рисунке 3.1 [194]. Температура образцов при испытании составляла 25°C.

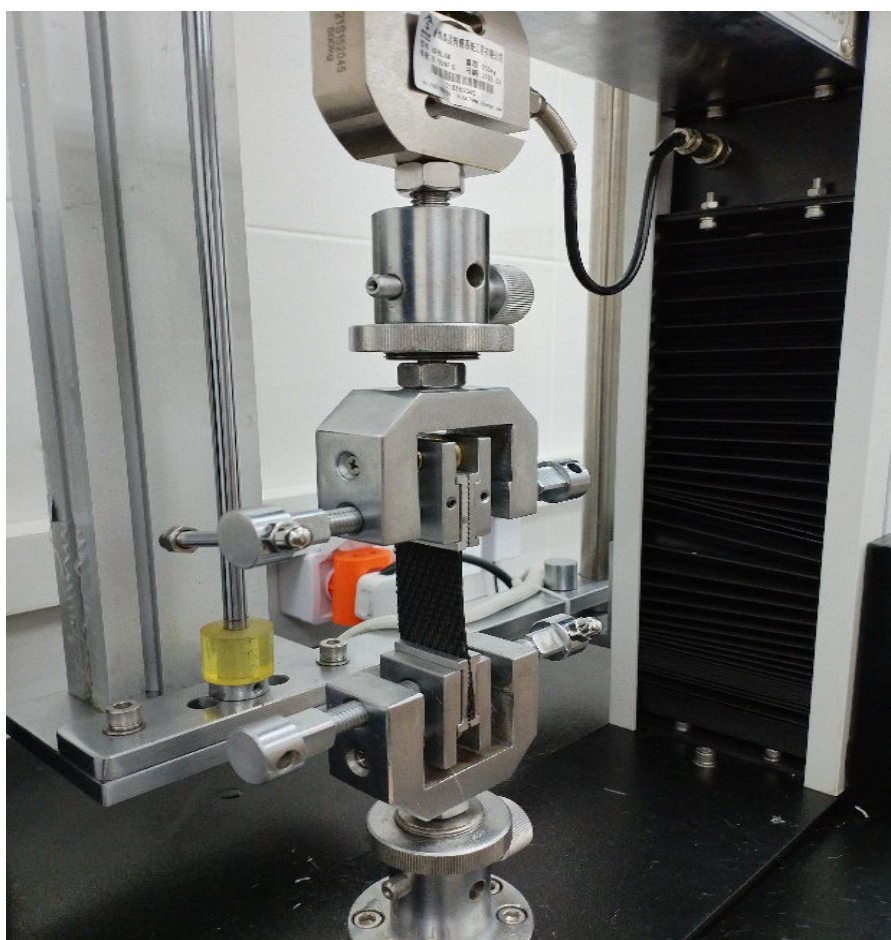


Рисунок 3.1 – Определение модуля упругости полиуретанового связующего на испытательной машине ZY6010H [194]

После зажима полосок полиуретана в испытательной машине выполнялось контролируемое нагружение каждой из полосок при скорости

раздвижения зажимов испытательной машины  $1,0 \pm 0,5$  % в минуту до величины относительного удлинения 0,5%, что позволило оценить их поведение под воздействием растягивающих сил. Затем, согласно приведенной в [196] методике по диаграмме определили значения нагрузки, соответствующие величинам относительного удлинения 0,1 и 0,3% и вычисляли модуль упругости при растяжении  $E_p$  в МПа по формуле:

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1)l_0}{A_0(\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \quad (3.1)$$

где  $F_2$  – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3%, Н;

$F_1$  – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1%, Н;

$l_0$  – расчетная длина образца, мм;

$A_0$  – площадь начального поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>;

$\Delta l_2$  – удлинение, соответствующее нагрузке  $F_2$ , мм;

$\Delta l_1$  – удлинение, соответствующее нагрузке  $F_1$ , мм [196].

Результатом вычисления модуля упругости было принято среднеарифметическое значение всех параллельных определений при стандартной величине отклонений по ГОСТ 14359-69 [198].

Определение модуля упругости  $E_p$  остальных образцов (диаметром 150 мм и 400 мм) не проводилось, т.к. при их изготовлении использовалась та же марка полиуретана, что и у испытываемых образцов.

### **3.4 Зависимость модуля упругости полиуретана от его марок (групп) и температуры**

Так как при расчете и проектировании ПГР в качестве связующего может быть использован полиуретан с существенно отличающимися физико-механическими свойствами по модулю упругости, то считаем необходимым исследовать зависимость прочности плоскостворачиваемых гибких рукавов от модуля упругости соответствующих марок (групп) полиуретанов

(таблица 3.1), а также определить влияние этого параметра на прочность рукавов.

Модуль упругости при растяжении определяют по ГОСТ 9550-81 [196]. Возможные значения модуля упругости полиуретана при растяжении согласно ГОСТ 34376.1-2017 [199] разделены на 13 групп и обозначены тремя цифрами (таблица 3.1).

Считаем, что свойство плоскосворачиваемости ППР может быть обеспечено при использовании полиуретана не выше группы 010 с модулем упругости до 110 МПа (таблица 3.1). Однако, если требование плоскосворачиваемости для заказчика не является обязательным, а важна максимальная прочность гибкого трубопровода, то могут быть использованы другие марки (группы) полиуретана вплоть до группы 999 с модулем упругости более 10000 МПа.

Таблица 3.1-Обозначения для модуля упругости при растяжении [199]

Обозначение группы	Диапазон значений модуля упругости при растяжении/ изгибе, МПа
002	$\leq 30$
004	$> 30, \text{ но } \leq 50$
006	$> 50, \text{ но } \leq 70$
008	$> 70, \text{ но } \leq 90$
010	$> 90, \text{ но } \leq 110$
015	$> 110, \text{ но } \leq 200$
025	$> 200, \text{ но } \leq 300$
040	$> 300, \text{ но } \leq 500$
075	$> 500, \text{ но } \leq 1000$
200	$> 1000, \text{ но } \leq 3000$
400	$> 3000, \text{ но } \leq 6000$
800	$> 6000, \text{ но } \leq 10000$
999	$> 10000$

Подставив исходные данные для трубопровода диаметром  $DN = 150$  мм, образец №3 (таблица А.1) и значения модуля упругости для различных марок (групп) связующего  $E_M$  (таблица 3.1) в зависимость (2.98) для разрывных давлений, обусловленных разрывом уточных нитей, строим график зависимости разрывных давлений от модуля упругости полиуретана (рисунок 3.2).

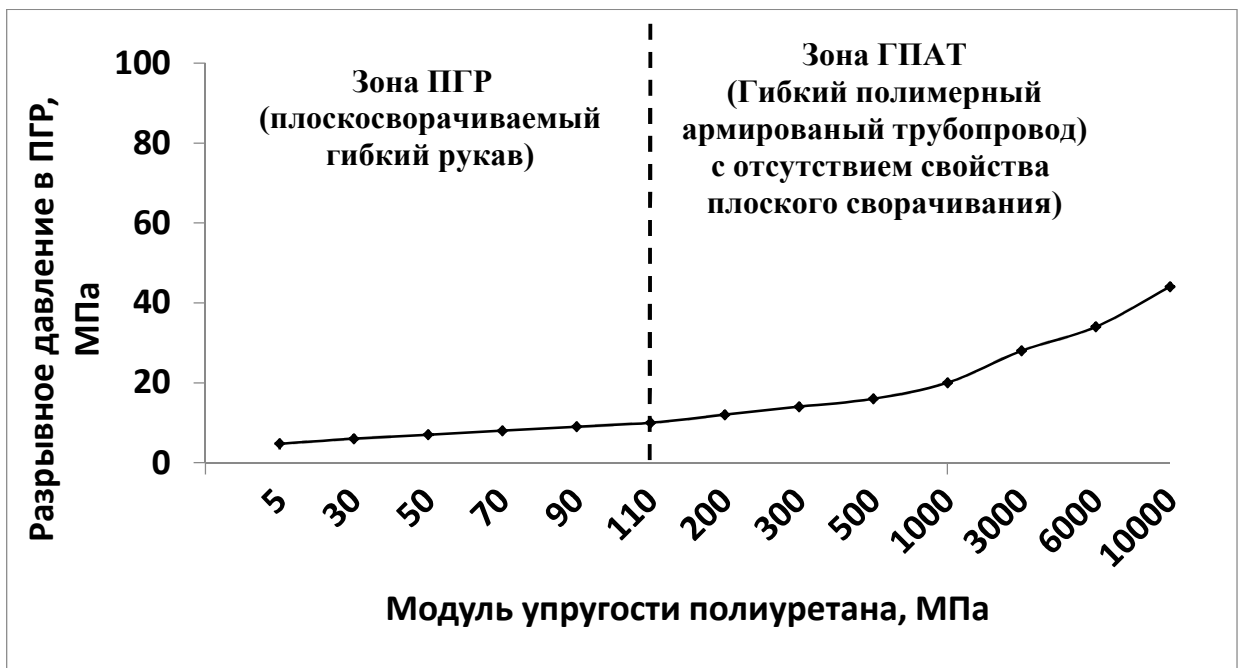


Рисунок 3.2 – Зависимость разрывного давления от модуля упругости полиуретана

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 (2.98) показали, что чем ниже прочность уточных нитей армирующей оболочки, тем существеннее влияние полиуретана, так как в этом случае имеет место перераспределение усилий в пользу связующего.

Необходимо отметить, что при значениях модуля упругости от 110 МПа и более рукав становится гибким, а не плосковорачиваемым, при этом влияние полиуретана резко возрастает. Так, например, при значении модуля упругости 500 МПа влияние связующего составит 33% с тенденцией резкого роста при дальнейшем увеличении модуля упругости. В таком случае, если не учитывать влияние полиуретана, резко возрастает погрешность.

В связи с тем, что ПГР в настоящее время используются в различных климатических условиях при температуре от  $-60$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ , рассмотрен вопрос зависимости модуля упругости полиуретана и разрывного давления в рукаве от температуры связующего. Анализ опубликованных работ о свойствах конструкционных полиуретанов [146-148] показал, что модуль упругости данного материала при повышении температуры снижается, а, следовательно, разрывное давление в ПГР, как показывают расчеты по зависимости (2.98), будет уменьшаться. Так, в работе Яковлева С.Н. [148] приводится зависимость модуля упругости полиуретанов различной твердости от температуры (рисунок 3.3), из которой следует, что при повышении температуры этот показатель снижается, а при ее понижении имеет место рост этого параметра.

Данные зависимости автор аппроксимирует выражением [148]:

$$E = 35 - 0,16T - (95 - ShA) \quad (3.2)$$

где  $E$  – модуль упругости полиуретана;

$T$  – температура в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$ShA$  – твердость в единицах по Шору.

Твердость используемого полиуретана в исследуемых образцах ПГР равняется 69 ShA, поэтому зависимость (3.2) для определения модуля упругости полиуретана  $E_M$  примет вид:

$$E_M = 9 - 0,16t \quad (3.3)$$

где  $t$  – температура в °С;

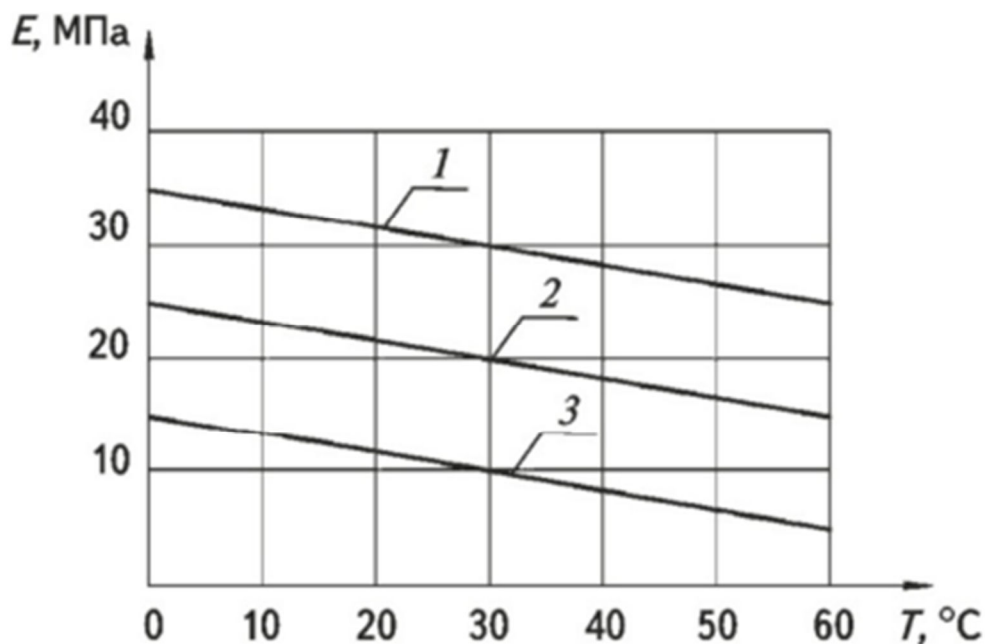


Рисунок 3.3 – Зависимость модуля упругости полиуретана от температуры [148]

На основе анализа работы Яковлева С.Н. сделали вывод, что модуль упругости при повышении температуры уменьшаться, а, следовательно, влияние полиуретана на прочность ПГР будет снижаться. В связи с этим наиболее неблагоприятным случаем будет предельно-максимальная температура эксплуатации трубопровода. Поэтому на основе полученной формулы (3.3) определим изменение модуля упругости полиуретана в случае увеличения температуры от 0 до +60°С для образца ПГР №3 диаметром DN = 150 мм (таблица А.1). Построим график зависимости этих показателей (рисунок 3.4).

Анализ данной зависимости показал, что с увеличением температуры полиуретана снижается модуль его упругости, что подтверждает приведенную в [148] зависимость (3.2).

Подставив в имеющуюся зависимость (2.98) значение модуля упругости полиуретана, соответствующее каждой из температур указанных на Рисунке 3.4, был получен график зависимости разрывного давления в

ПГР, обусловленного разрушением нитей утка от температуры полиуретана (рисунок 3.5).

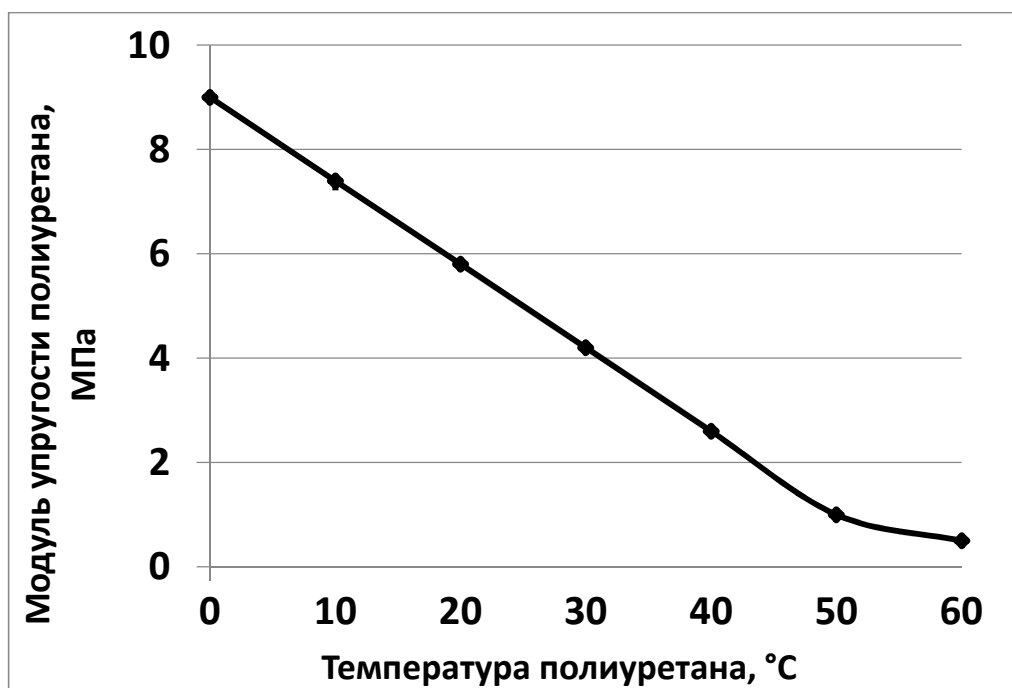


Рисунок 3.4 – Зависимость модуля упругости полиуретана от температуры

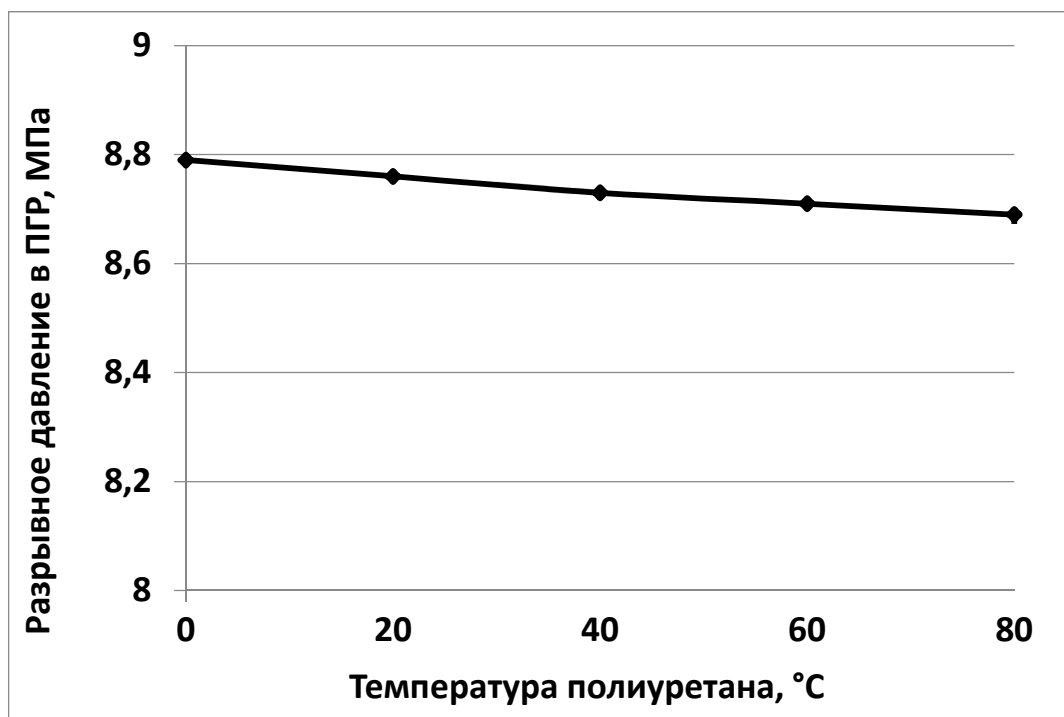


Рисунок 3.5 – Зависимость разрывного давления от температуры полиуретана

Анализ графика показал, что наиболее неблагоприятным случаем при расчете и проектировании рациональных структур ПГР будет предельно максимальная температура его эксплуатации. При этом также необходимо учитывать температуру перекачиваемого продукта, которая влияет на температуру связующего (полиуретана).

### **3.5. Подтверждение достоверности исходных данных, предоставленных производителями**

Достоверность предоставленных производителями значений по разрывным усилиям нитей АТО ПГР была подтверждена комплексом испытаний на разрыв тех же нитей на отечественной разрывной машине РМИ-250, (рисунок 3.6) в соответствии с ГОСТ 6611.2-73 «Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве» [200].

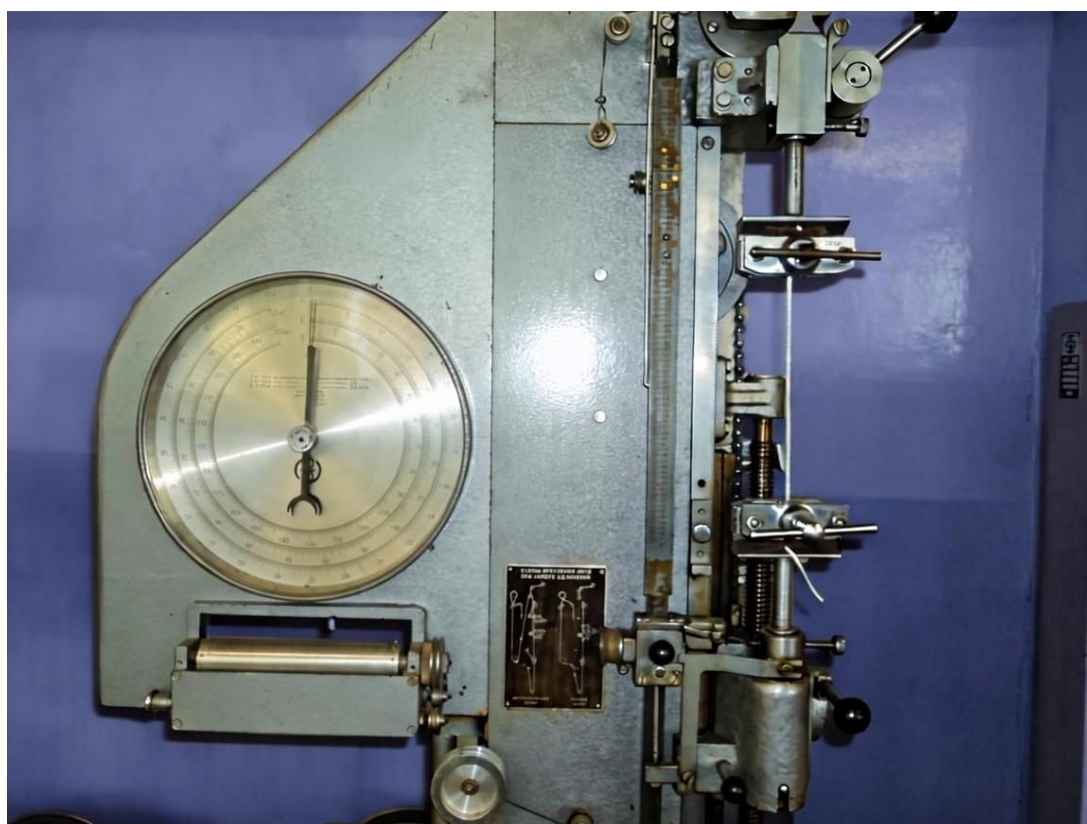


Рисунок 3.6 – Определение усилия разрыва нитей АТО на разрывной машине РМИ-250

Полученные в ходе эксперимента данные приведены в таблице 3.2. Максимальное расхождение после экспериментального определения усилия разрыва нитей составило до 2,5%, что подтверждает высокую степень соответствия между экспериментальными и предоставленными производителями значениями, поэтому было принято решение использовать данные производителей для последующего расчета разрывных давлений в ПГР и ПНР по зависимостям (2.98) и (2.102).

В ходе комплексного анализа структуры АТО ПГР были выявлены существенные различия в линейных плотностях, геометрических и прочностных параметрах нитей основы и утка. Исследование показало, что нити утка, как правило, обладают значительно большей линейной плотностью, изгибной жёсткостью и прочностью по сравнению с нитями основы.

Таблица 3.2 - Сравнительная таблица значений разрывных усилий нитей

Значение разрывного усилия нитей полученных от производителей, Н	Значение разрывного усилия нитей при эксперименте, Н	Расхождение, %
287	292	1,7
356	365	2,5
505	496	1,8
645	631	2,2
795	804	1,1
892	876	1,8
1745	1720	1,5
2218	2182	1,7

Действие внутреннего давления в ПГР вызывает значительные растягивающие усилия в нитях и сильное их смятие в зонах контакта. Нити

утка в отличие от нитей основы испытывают существенно большие растягивающие усилия, которые становятся особенно большими при действии разрывного давления в ПГР. Нити утка практически вытягиваются «в струну», их прогибы становятся близкими к нулю. Такое поведение нитей утка вызывает следствие – уточные нити воздействуют на нити основы, выдавливая их, и вызывают дополнительную деформацию, в результате чего нити основы получают максимальный прогиб. К аналогичному выводу пришли авторы работ [164, 175] при исследовании поведения при действии внутреннего давления такой разновидности гибких плоскостворачиваемых рукавов как пожарные напорные рукава. В работе [175] отмечается: «ткани несущих оболочек пожарных напорных рукавов 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». Справедливость такого положения подтверждена результатами работ [164, 175].

Аналогичное допущение о том, что при действии внутреннего гидростатического давления, в том числе и разрывного, нити утка и основы получают соответственно близкий к нулевому ( $h_y = 0$ ) и максимальный прогиб, принимаем и для ПГР. Исходя из этого допущения, определим коэффициенты  $C_y$  (2.71) и  $C_o$  (2.79). Коэффициент  $C_y$ , зависящий от величины прогиба уточной нити  $h_y$  по вертикали, проходящего через центр сечения основной нити (рисунок 2,4, б), при значении  $h_y = 0$  становится равным нулю.

Из основного геометрического соотношения (условия совместности прогибов нитей) для тканей переплетения саржа 1/2 (2.30) следует выражение для прогиба основной нити [194]:

$$h_o = y(q_{o1}) = 0,5[\eta_{oB}(q_o)d_o + \eta_{yB}(q_y)d_y] + 0,5[\eta_{oB}(q_{o1})d_o + \eta_{yB}(q_{y1})d_y] \quad (3.1)$$

На основе (3.1) определим коэффициент  $C_o$  (2.79), зависящий от этого параметра и необходимый для расчета разрывного давления в ПГР [194].

При расчете ПНР с АТО полотняного переплетения на разрыв от действия ВГД высота волны изгиба нити основы  $h_O$  следует из геометрического соотношения Н.Г. Новикова (2.60) при  $h_y = 0$ :

$$h_O = d_O \eta_{OB} + d_y \eta_{yB}. \quad (3.2)$$

В этом случае коэффициент  $C_O$  определялся согласно (2.104). Расчет разрывных внутренних гидростатических давлений в ПГР и ПНР  $p_{разр.}^y$  и  $p_{разр.}^O$  выполнялся по формулам (2.98)-(2.102).

Разрывные внутренние гидростатические давления в ПГР и ПНР рассчитывались на основе исходных данных, которые сведены в таблицу А.1. При этом расчеты выполнялись по компьютерной программе, свидетельство для которой представлено в приложении Б, в основу которой положены основные зависимости (2.71), (2.79), (2.98)-(2.104).

Расчетные разрывные давления, найденные по (2.98) и (2.102), и экспериментальные значения разрывных давлений ПГР и ПНР, а также расхождение между ними в % приведены в таблице 3.3.

Анализ результатов экспериментов по определению разрывных внутренних гидростатических давлений ПГР указанных диаметров, проведенных в лабораториях по испытаниям ПГР в ООО «Балтикфлекс», г. Санкт-Петербург и АО «Ивхимпром», г. Иваново, показал, что разрушение рукавов имело место от разрыва уточных нитей (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 - Разрушение ПГР от разрыва уточных нитей

Таблица 3.3 - Экспериментальное разрывное ВГД в ПГР, обусловленное разрывом уточных нитей

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
<b>Гибкие плосковорачиваемые рукава</b>					
100	5,02	12,293	5,00	0,40	<b>0,04</b>
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	
<b>Напорные пожарные рукава</b>					
150	10,625	2,770	2,60	6,53	<b>0,07</b>
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	

Установлено, что ПНР как разновидность ПГР, также разрушаются от разрыва нитей утка, что было подтверждено сотрудниками МЧС России.

Федеральным государственным бюджетным учреждением Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства чрезвычайных ситуаций Российской Федерации (ФГБУ ВНИИПО МЧС России) (г. Балашиха, Московская обл.) были предоставлены данные по разрывным давлениям латексированных ПНР производства ПО «БЕРЕГ» диаметров от 51 мм до 150 мм, полученные в

результате их испытаний на разрыв в соответствии с ГОСТ Р 51049-2008 по разрыву ПНР [112, 193].

Экспериментальные и расчетные разрывные давления в ПНР представлены для образцов №6-№10 в таблице 3.3 [194].

Результаты испытаний ПГР и ПНР подтверждают сделанный ранее вывод, что в большинстве случаев  $p_{разр.}^y < p_{разр.}^o$  и разрушение обуславливается разрывом нитей утка. Из-за того, что первым происходит разрыв уточных нитей (при более низких разрывных давлениях), обеспечить проверку совпадения значений, полученных в ходе эксперимента, с расчетным значением разрывного давления по основным нитям АТО ПГР согласно зависимости (2.102), не представляется возможным (единственным возможным случаем проверки будет являться испытания заведомо некорректно спроектированного рукава).

Для оценки точности соответствия расчетных и экспериментальных данных по разрывным давлениям был рассчитан коэффициент несоответствия Тэйла, который позволяет получить объективную картину соответствия или несоответствия расчетных и экспериментальных данных. Для ПГР и ПНР (таблица 3.3) этот коэффициент имеет значения соответственно 0,04 и 0,07. Уровень соответствия расчетных и экспериментальных данных тем выше, чем ближе значение этого коэффициента к нулю. При значении коэффициент Тэйла в диапазоне от 0,1 до 0,15, соответствие расчетных и экспериментальных данных считается высоким [201].

В нашем случае значение этого коэффициента получилось еще более низким, что говорит о высоком уровне соответствия расчетных и экспериментальных данных по разрывным давлениям. Таким образом, делаем вывод о достоверности расчетных зависимостей (2.98)-(2.102).

### Выводы по главе

1. Определены необходимые исходные данные для прочностного расчёта плосковорачиваемых гибких рукавов и пожарных напорных рукавов производства ПО «БЕРЕГ» на основе которых рассчитаны разрывные давления являющиеся важными параметрами, регламентируемыми ГОСТ Р 58714-2019.

2. Установлено, что применение в качестве связующих полиуретанов с большим модулем упругости приводит к увеличению разрывного давления, что необходимо учитывать при создании новых образцов этих технических изделий с рациональной структурой.

3. Повышение температуры вызывает снижение модуля упругости полиуретана, что приводит к падению разрывного давления в ПГР и наоборот снижение температуры вызывает увеличение модуля упругости, что приводит к росту разрывного давления, то есть упрочнению рукава. Расчет и проектирования рукава целесообразно проводить для наиболее неблагоприятного случая при максимально возможных эксплуатационных температурах полиуретана, которому будет соответствовать наименьшая величина разрывного давления ПГР.

4. Достоверность разработанных расчетных зависимостей подтверждена сопоставлением теоретических и экспериментальных данных по разрывным давлениям плосковорачиваемых гибких и близких к ним по структуре напорных пожарных рукавов, показавшим высокий уровень их соответствия по коэффициенту Тэйла, на основании чего разработанные теоретические положения и зависимости рекомендуются при расчете и проектировании данных технических изделий.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР ПЛОСКОСВОРАЧИВАЕМЫХ ГИБКИХ РУКАВОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

### **4.1. Методика расчета и проектирования рациональных структур плоскосворачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления**

Превышение экспериментальных значений над минимальными требованиями ГОСТ Р 58714-2019 дает дополнительный запас прочности ПГР при действии ВГД перекачиваемого продукта, но в то же время приводит к увеличению материалоемкости ПГР, а, следовательно, к увеличению его массы и удорожанию готового изделия. Современные тенденции во многих отраслях промышленности при производстве изделий с рациональными структурами направлены на снижение материалоемкости, и, в конечном итоге, себестоимости. Для производства такой продукции необходимо разработать научно обоснованную методику расчета и проектирования ПГР, позволяющую произвести подбор рациональных параметров как армирующей тканой оболочки, так и используемого связующего, и спроектировать ПГР, которые будут соответствовать минимальному расходу материала и отвечать требованию ГОСТ Р 58714-2019 по разрывному давлению.

Производство ПГР и проведение приемо-сдаточных испытаний, а также последующее получение сертификата соответствия - трудозатратный процесс. Изготовление ПГР включает в себя проектирование, проведение испытаний нескольких образцов или целой партии, верификацию полученных основных параметров с требованиями ГОСТ Р 58714-2019 и заказчика и сертификацию рукавов. Отметим основные этапы производства ПГР в соответствии с ГОСТ Р 58714-2019: получение технического задания

на необходимый ПГР; расчет количественных и прочностных параметров для проектируемой АТО ПГР; расчет разрывных давлений ПГР; проведение экспериментов по разрыву выборочных образцов; сравнение расчётных данных с экспериментальными результатами; проверка основных параметров ПГР (внутренний диаметр, толщина стенки и т. д.); получение итогового сертификата после испытания ПГР.

В нашей работе не будет рассмотрен весь процесс создания и запуска в эксплуатацию новых ПГР согласно ГОСТ Р 58714-2019. Одна из основных задач - разработать методику расчета и проектирования ПГР с обеспечением рациональных параметров и требуемого запаса прочности, устанавливаемого ГОСТ Р 58714-2019. Данная методика позволит подбирать рациональные параметры АТО ПГР и характеристики связующего, что приведёт к снижению материалоёмкости при соблюдении условия прочности.

Предлагаемая методика проектирования ПГР разработана на основе полученных зависимостей (2.98)-(2.102). Такая методика может быть использована для прочностного расчета и рационального проектирования не только ПГР, но и схожих с ними по конструкции ПНР (рисунок 4.1).

Разрывное давление при проведении испытания гидростатическим давлением для данного рукава определяется по формуле:

$$p_{\text{разр}} = kPN \quad (4.1)$$

где  $k$  - коэффициент запаса, показывающий во сколько раз разрывное давление превосходит рабочее;

$PN$  – рабочее давление рукава.

Разработанная методика состоит из следующих этапов:

1) определение необходимого разрывного давления проектируемого ПГР или ПНР по зависимости (4.1);

2) предварительный подбор материала и характеристик нитей АТО (диаметров, коэффициентов смятия, линейных плотностей, модулей

упругости, усилий разрыва, или экспериментальное исследование данных параметров, если они не указаны в паспорте изделий);

3) предварительный выбор модуля упругости связующего (полиуретана) или экспериментальное определение данного параметра;

4) предварительное проектирование структуры АТО (выбор геометрической плотности ткани армирующей оболочки по основе и утку и линейных плотностей нитей);

5) подбор толщины стенки рукава с учетом параметров и мощности линии экструзии и величины внутреннего и наружного слоев;

6) предварительный расчет и сравнение с разрывным давлением, полученным в п.1 данной методики:

6.1) если расчетное разрывное давление выше заданного, но превышение находится в пределах 2-5%, корректировка параметров п.2 – п.5 не проводится;

7) расчётное давление ниже заданного – увеличиваем линейные плотности нитей АТО или снижаем геометрическую плотность ткани армирующей оболочки;

7.1) расчётное давление выше заданного (более чем на 5%) – снижаем линейные плотности нитей АТО или увеличиваем геометрическую плотность тканой оболочки;

7.2) корректировка может затрагивать другие параметры АТО ПГР;

8) передаем данные на производство для изменения технологических параметров оборудования и дальнейшего изготовления ПГР;

9) полученные образцы испытываем согласно ГОСТ Р 58714-2019;

10) сравниваем экспериментальное разрывное давление с расчетным, при расхождении проверяем условия п. п. 7.1 и п. п. 7.2;

11) получаем заключения по разрывным давлениям и сертификат соответствия изделия стандартам безопасности.

Разработанная методика позволяет рассчитать и спроектировать рациональную структуру ПГР в соответствии с ГОСТ Р 58714-2019,

минимизируя его материалоемкость, а, следовательно, себестоимость, что является необходимым условием для современного производства [202].

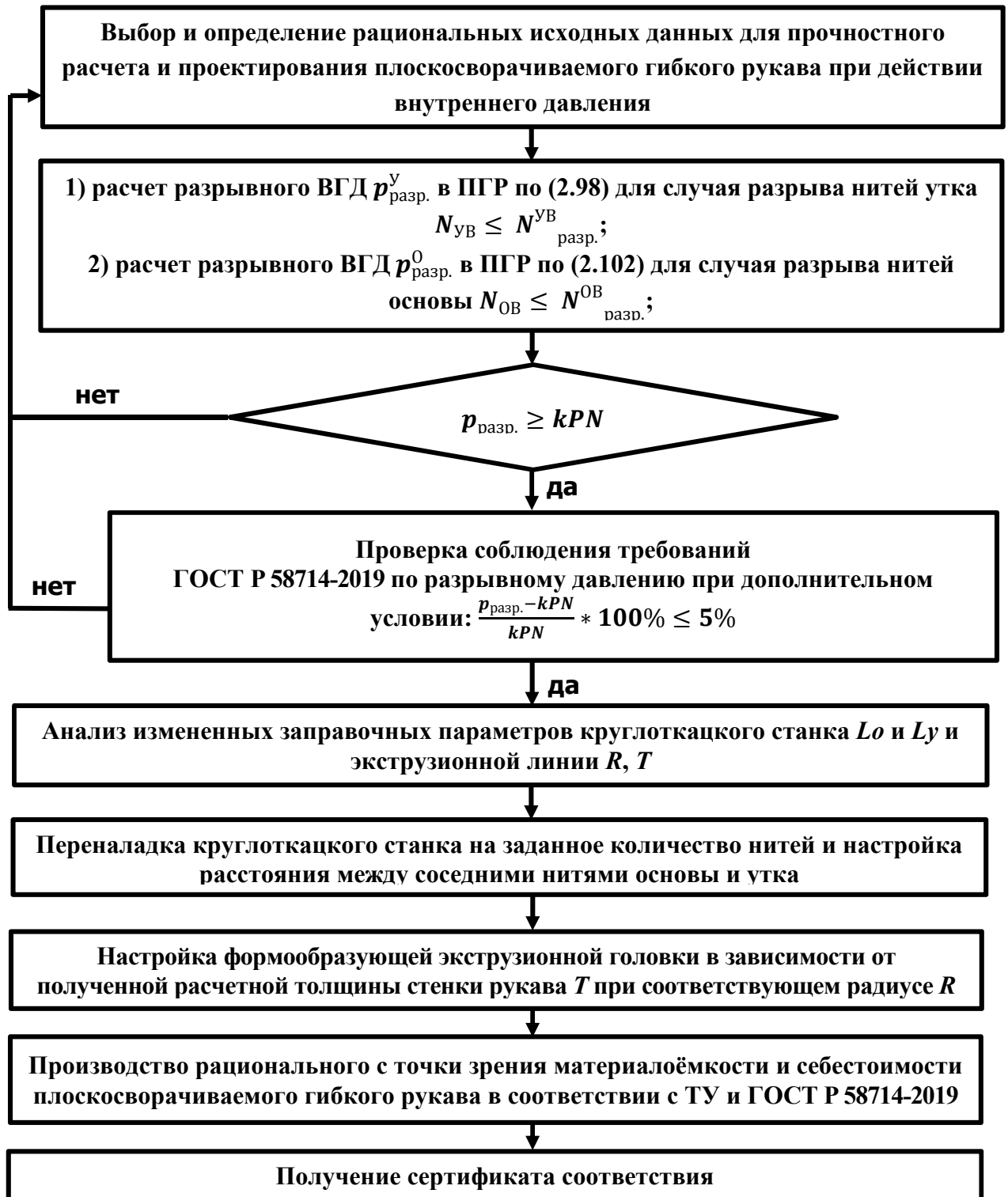


Рисунок 4.1–Методика расчета и рационального проектирования плоскостворачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления

Геометрические плотности по нитям основы и утка в АТО ПГР сильно влияют на величину разрывных давлений  $p_{разр}^V$  и  $p_{разр}^O$ , определяемых по формулам (2.98) и (2.102) соответственно. Поэтому одним из действенных путей увеличения прочностных характеристик ПГР при действии ВГД является уменьшение геометрической плотности ткани армирующей оболочки по нитям основы  $L_o$  и утка  $L_y$ . Если в исходных данных нет значений этих параметров, то их можно измерить непосредственно на образце.

Для обеспечения минимального расхода материалов при изготовлении АТО ПГР по ГОСТ Р 58714-2019 кроме геометрической плотности ткани также необходим рациональный выбор линейных плотностей, диаметров используемых нитей и других параметров.

#### **4.2. Применение методики для расчета и проектирования плосковорачиваемых гибких рукавов при действии ВГД при условии максимального снижения материалоемкости и обеспечении их прочности**

Разработанную методику прочностного расчета и проектирования плосковорачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления применим для выбора рациональных параметров ПГР.

Возьмем для расчета имеющиеся исходные данные для образца ПГР №3 номинальным диаметром  $DN = 150$  мм и произведем расчет его разрывного давления. Данный рукав разработан под рабочее давление 4,2 МПа. Разрывное давление для данного рукава определяется по (4.1) при коэффициенте  $k=1,8$ , согласно п.10.11 ГОСТ Р 58714-2019. Данный рукав будет применяться на суше, поэтому к нему не предъявляются

дополнительные требования по прочности. В этом случае разрывное давление составит 7,56 МПа.

При рассмотрении прочностных показателей ПГР (таблица 3.3) необходимо отметить, что разрывные давления, обусловленные разрывом нитей основы АТО, всегда существенно выше давлений, обусловленных разрывом нитей утка. С точки зрения прочности такой запас по основным нитям приводит к увеличению материалоемкости без увеличения прочности рукава в целом. Поэтому целесообразно с целью максимального снижения материалоемкости установить разрывное давление  $p_{разр}^O$  равным  $p_{разр}^Y$  при соответствии обоих давлений условиям прочности (2.94) и (2.95).

В этом случае зависимости (2.98)-(2.102) дают более низкие давления при соблюдении условий прочности ПГР следующими способами:

- изменив геометрическую плотность ткани армирующей оболочки по основным нитям, оставив без изменения линейную плотность этих нитей;
- изменив как геометрическую плотность ткани АТО по основным нитям, так и по уточным нитям совместно;
- изменив линейную плотность нитей основы и утка как по отдельности, так и совместно;
- рационально подобрав значения всех этих параметров.

Снижение разрывного давления в случае разрушения основных нитей проведем для ПГР №3 (таблица А.1). В нашем случае расчетное давление  $p_{разр}^Y = 8,83$  МПа, а  $p_{разр}^O = 15,88$  МПа. В соответствии с паспортом изделия рукав рассчитан под разрывное давление 7,56 МПа. Поэтому принято решение рационального подбора параметров данного рукава с целью снижения его материалоемкости при значениях  $p_{разр}^Y$  и  $p_{разр}^O$  не ниже паспортного разрывного давления 7,56 МПа. Получим зависимости разрывного давления по основным и уточным нитям в данном рукаве от изменения геометрической плотности ткани АТО по основе и утку (рисунок 4.2), (рисунок 4.3). Расчеты разрывных давлений в ПГР для построения

графических зависимостей выполнялись по компьютерной программе (приложение Б), в основу которой положены основные зависимости (2.71), (2.79), (2.98)-(2.104) [203].

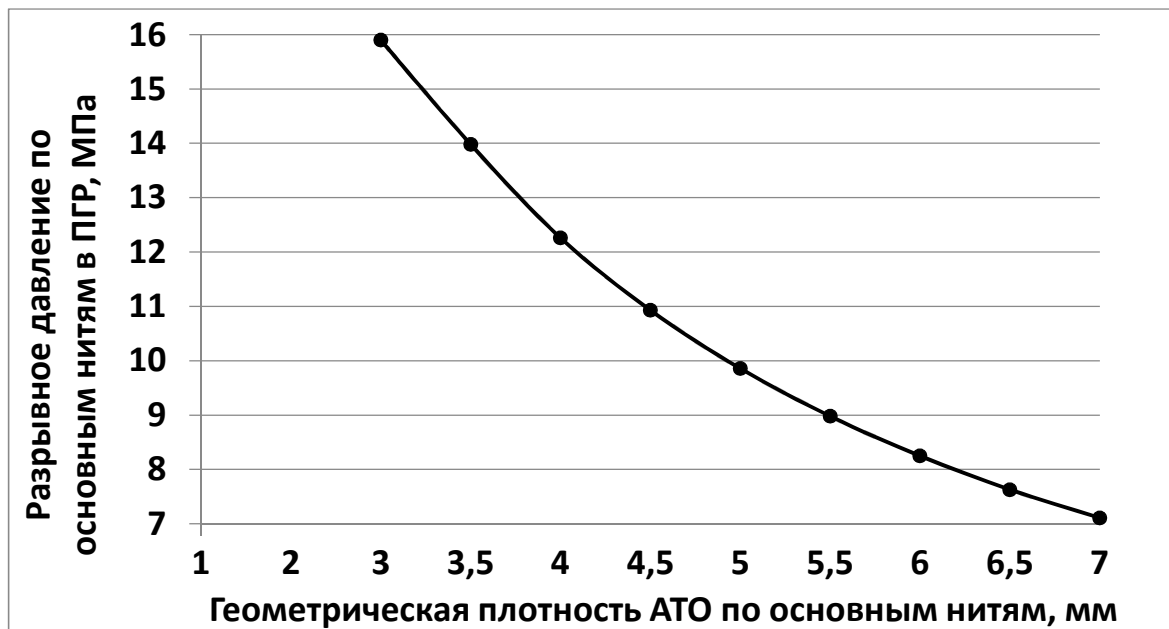


Рисунок 4.2 – Зависимость разрывного давления по основным нитям от геометрической плотности ткани АТО по основе

Как видно на рисунке 4.2, рациональное значение геометрической плотности ткани АТО по нитям основы  $L_O$ , соответствующее давлению  $p_{разр}^O = 7,56$  МПа, находится в пределе от 6,4 до 6,8 мм, поэтому примем значение  $L_O = 6,55$  мм. Подставив данное значение  $L_O$  в зависимости (2.98)-(2.102), получаем значения разрывных давлений  $p_{разр}^V = 7,91$  МПа и  $p_{разр}^O = 7,58$  МПа. Так как значение разрывного давления по нитям утка все еще превышает паспортное разрывное давление в ПГР, равное 7,56 МПа, то подберем рациональный параметр геометрической плотности ткани армирующей оболочки по уточным нитям.

Из анализа графика зависимости разрывного давления от геометрической плотности ткани АТО по уточным нитям (рисунок 4.3) находим, что рациональное значение геометрической плотности ткани армирующей оболочки по нитям утка  $L_U$  составляет приблизительно 7,65 мм.

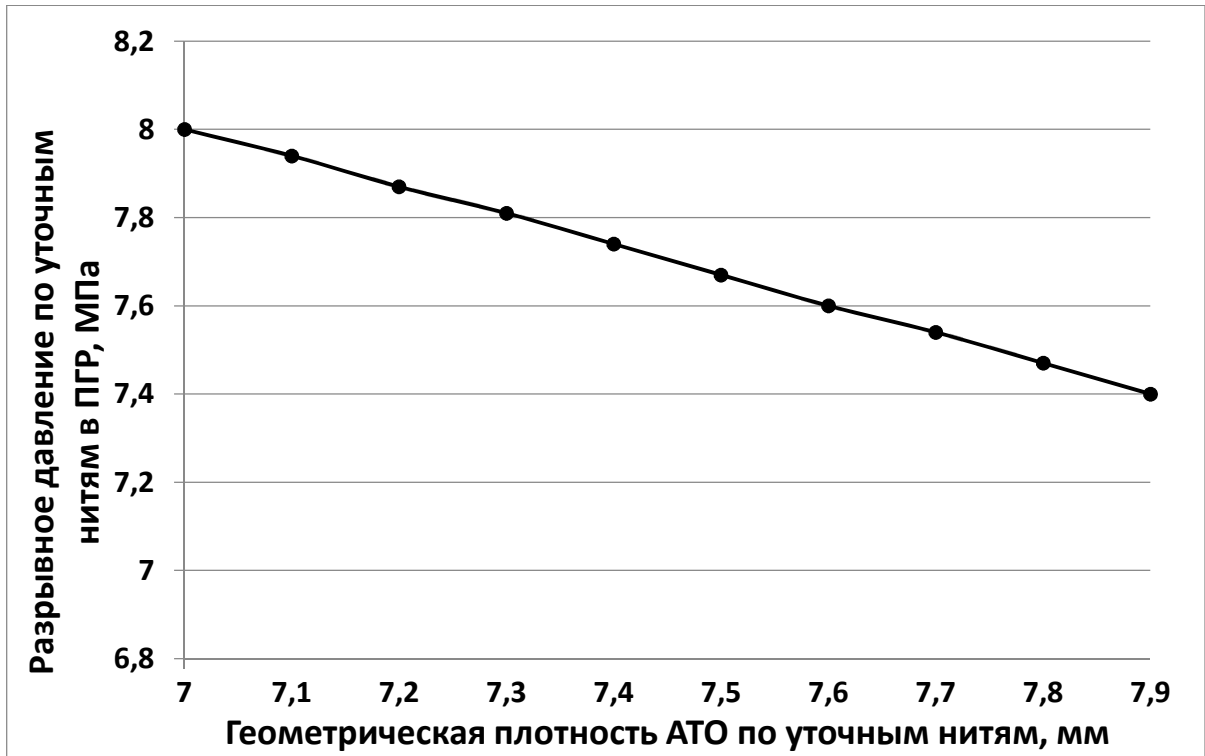


Рисунок 4.3 – Зависимость разрывного давления по уточным нитям от геометрической плотности ткани АТО по утку

Подставляя значения  $L_y = 7,65$  мм и  $L_o = 6,55$  мм получаем следующие результаты по разрывным давлениям в ПГР:  $p_{разр}^y = 7,573$  МПа;  $p_{разр}^o = 7,562$  МПа, что соответствует требуемому паспортному давлению с погрешностью не более 1%.

Также рассмотрим еще один указанный выше способ снижения материалоемкости ПГР, а именно, исследуем зависимость разрывных давлений от линейных плотностей нитей АТО.

Для первого случая снизим линейную плотность применяемых основных нитей (рисунок 4.4).

Из анализа графика зависимости разрывного давления от линейной плотности нитей основы (рисунок 4.4) находим, что рациональное значение линейной плотности нитей основы  $T_o$  составляет 1560 Текс.

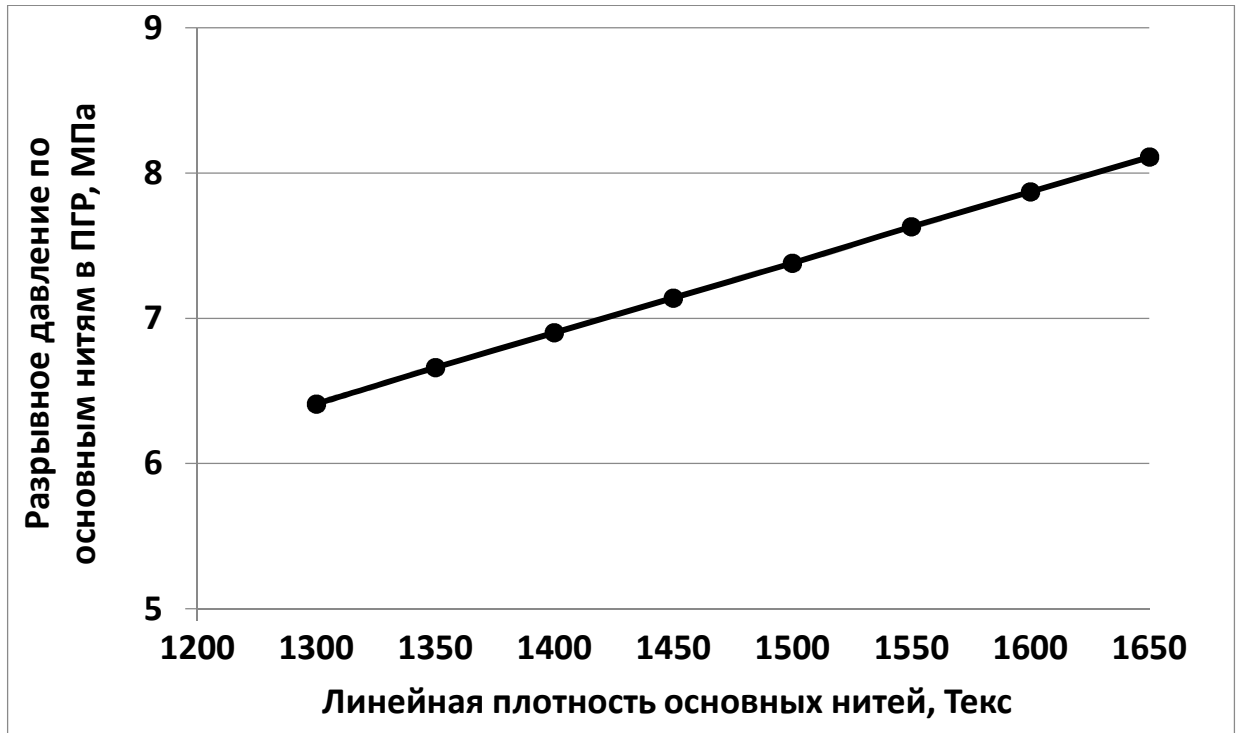


Рисунок 4.4 – Зависимость разрывного давления от линейной плотности основных нитей

Подставив данное значение  $T_O$  в зависимости (2.98)-(2.102), получаем значения разрывных давлений  $p_{разр}^V = 8,05$  МПа и  $p_{разр}^O = 7,63$  МПа. Так как значение разрывного давления по нитям утка все еще существенно превышает паспортное разрывное давление в ПГР, равное 7,56 МПа, то подберем рациональный параметр линейной плотности уточных нитей (рисунок 4.5).

Из анализа графика зависимости разрывного давления от линейной плотности уточных нитей (рисунок 4.5) определили, что рациональное значение линейной плотности  $T_Y$  составляет 6250 текс.

Найдем усилия разрыва уточной и основной нитей при значениях линейных плотностей  $T_O = 1560$  текс,  $T_Y = 6250$  текс.

$$N_{разр}^{YB} = T_Y P_{уд} , \quad (4.2)$$

$$N_{разр}^{OB} = T_O P_{уд} , \quad (4.3)$$

где  $P_{уд}$  - удельная разрывная прочность при растяжении материала используемых полиэфирных нитей, равная 0,537 Н/текс.

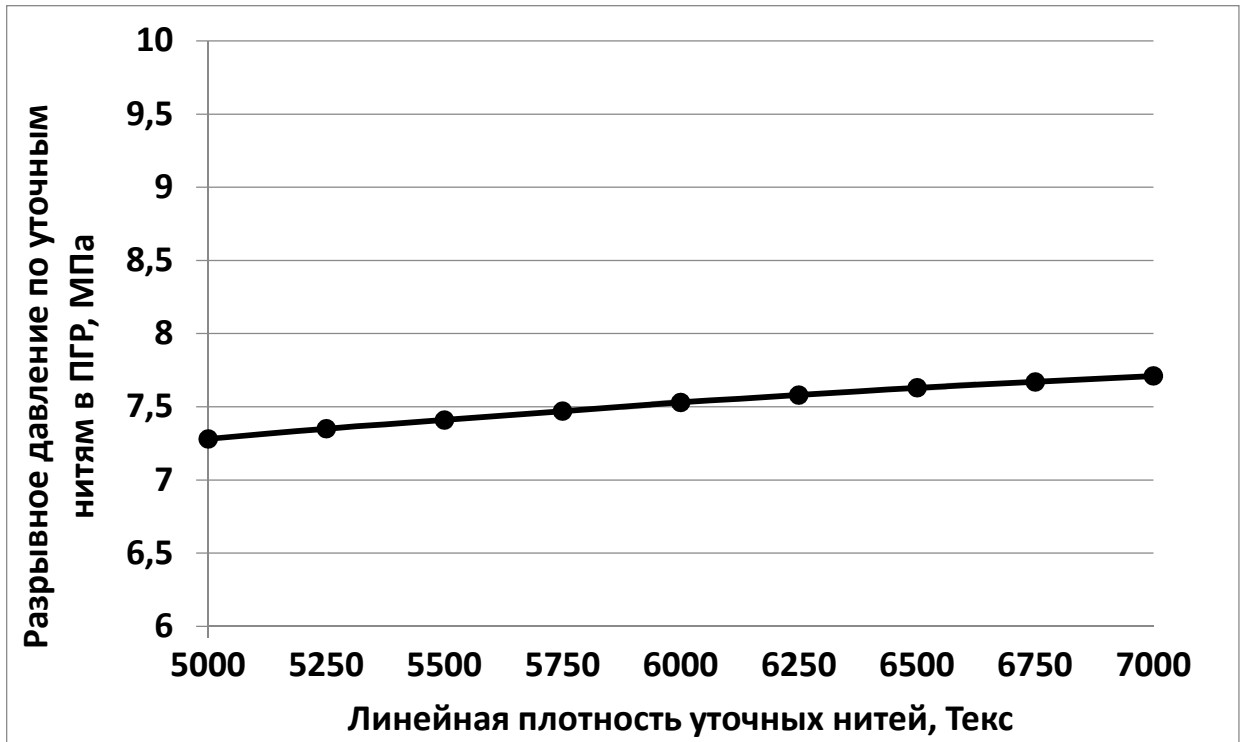


Рисунок 4.5 – Зависимость разрывного давления от линейной плотности уточных нитей

Подставив рассчитанные значения  $N_{разр}^{OB}$  (4.2) и  $N_{разр}^{VB}$  (4.3) в зависимости (2.98) и (2.102), получаем  $p_{разр}^V = 7,581$  МПа и  $p_{разр}^O = 7,583$  МПа, что соответствует требуемому паспортному давлению с погрешностью не более 1%.

Определим процент снижения материалоемкости, как для случая снижения линейных плотностей нитей АТО, так и для случая увеличения геометрической плотности ткани АТО ПГР.

Учитывая, что данный ПГР уже был оптимизирован производителем, который применил весьма затратный метод проб и ошибок, мы рассчитали материалоемкость компонентов, затрачиваемых при его изготовлении после рационализации параметров, используемых при технологических операциях получения АТО.

В первом случае добились снижения линейных плотностей нитей до значений  $T_O = 1560$  текс,  $T_Y = 6250$  текс, что позволило снизить материалоемкость готового изделия на 17%, и подтвердить практическую значимость разработанной нами методики расчета и проектирования ПГР.

Второй случай рационализации позволил увеличить геометрические плотности ткани АТО по нитям основы и утка до значений  $L_y = 7,65$  мм,  $L_o = 6,55$  мм. В этом случае мы получили снижение материалоемкости ПГР на 15%, чем еще раз подтвердили практическую значимость разработанной методики расчета и проектирования ПГР.

Данный пример рационализации был проведен для рукава, полученного после нескольких попыток изготовления и серии опытов по его разрыву, то есть прошедшего опытную (дорогостоящую) оптимизацию путем проб и ошибок, и даже для такого рукава удалось установить его рациональные параметры, что стало возможным только благодаря получению основных расчетных зависимостей. Если рукав будет спроектирован каким-либо производителем впервые, без учета предлагаемой методики, то, скорее всего, он будет иметь более высокие запасы прочности, превышающие требования ГОСТ Р 58714-2019. В этом случае снижение материалоемкости расходуемых материалов при изготовлении ПГР может достигать нескольких десятков процентов, что при производстве данных рукавов обеспечит положительный экономический эффект и подтвердит практическую значимость разработанной методики. Также при расчете ПГР по предлагаемой методике и разработанной на ее основе программе (приложение Б) можно варьировать, не только геометрической плотностью ткани АТО или линейными плотностями нитей по отдельности, но и учитывать изменения этих параметров в совокупности. Такой способ позволит производителю выбирать рациональные параметры рукава и производить без потери качества изделия с минимальной материалоемкостью и себестоимостью. Подтверждением практической значимости исследования

является полученный акт внедрения методики расчета и проектирования рациональных структур ПГР в производственный процесс АО «ИВХИМПРОМ», который представлен в приложении В.

### **Выводы по главе**

1. На основе разработанных теоретических положений и зависимостей для прочностного расчета ПГР, анализа нормативной документации по техническим требованиям и методам испытаний рукавов разработана методика прочностного расчета и проектирования рациональных структур ПГР, соответствующая нормативам ГОСТ Р 58714-2019, на основе которой данные технические изделия могут быть произведены с наименьшей материалоемкостью и соответственно себестоимостью.

2. На основе разработанной методики расчета и проектирования ПГР определены рациональные параметры рукава диаметром  $DN = 150$  мм, при которых материалоемкость ПГР снизилась на 17%, что позволило также снизить стоимость готового продукта на рынке полимерных трубопроводов.

3. Разработанная методика прочностного расчета и проектирования ПГР позволяет выбрать рациональные технологические параметры для изготовления плоскосворачиваемых гибких рукавов с минимальной материалоемкостью и обеспечением требуемой прочности по ГОСТ Р 58714-2019.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа существующих отечественных и зарубежных исследований по расчёту и проектированию структур плоскосворачиваемых гибких рукавов установлено, что применение теоретических моделей, не учитывающих связующее, приводит к снижению расчётных разрывных давлений в рукавах по сравнению с фактическими, что сказывается на точности расчёта.

2. С использованием нелинейной теории изгиба гибких нитей и принятой системы допущений разработана обобщённая математическая модель взаимодействия нитей в армирующей тканой оболочке плоскосворачиваемого 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 АТО и связующем, геометрической плотностью ткани по утку и основе, радиусом и толщиной стенки рукава, при учёте изменения геометрических параметров армирующей оболочки под действием внутреннего гидростатического давления.

4. Впервые сформулированы условия прочности плоскосворачиваемых 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 плоскосворачиваемых 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**

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 плоскосворачиваемых 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 развитие технологий производства многослойных плоскосворачиваемых гибких рукавов. Это требует разработки теоретических основ и методик расчёта, учитывающих особенности структуры и взаимодействия нескольких слоёв армирующих оболочек, а также совершенствования технологических процессов формирования многослойных текстильно-полимерных композиционных изделий.

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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Минаков, А.П. Основы механики нити / А.П. Минаков // Научно-исследовательские труды Московского текстильного института. — М., 1941. — Т. IX. — Вып. 1 — С. 1–88.
2. Рахматуллин, Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматуллин, Ю.А. Демьянов — М.: Наука, 1961. — 246 с.
3. Щедров, В.С. Основы механики гибкой нити / В.С. Щедров — М.: Машгиз, 1961. — 215 с.
4. Алексеев, Н.И. Статика и установившееся движение гибкой нити / Н.И. Алексеев — М.: Легкая индустрия, 1970. — 270 с.
5. Якубовский, Ю. В. Основы механики нити / Ю.В. Якубовский, Я.И. Коритыцкий, И.И. Мигушов — М.: Легкая индустрия, 1973. — 276 с.
6. Полухин, В.П. Зависимость натяжения нити от радиуса кривизны огибаемого контура / В.П. Полухин, И.С. Зак, В.М. Никифоров // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. — 1963. — № 6. — С. 83–88.
7. Рагоза, И. В. Исследование прохождения нити по стержням малого диаметра / И.В. Рагоза, П.П. Шерман // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. — 1968. — № 1. — С. 88–93.
8. Мигушов, И.И. Натяжение нити с учетом изгибной жесткости и размеров поперечного сечения / И.И. Мигушов // Изв. вузов. Машиностроение. — 1972. — № 8. — С. 5–9.
9. Каган, В.М. Расчет натяжения нити, движущейся по поверхности с большой кривизной / В.М. Каган // Научно-исследовательские труды ВНИИЛТЕКМАШ — М., 1969. — № 15. — Вып. 1 — С. 194–204.
10. Васильченко, В.Н. Роль жесткости нити на изгиб в процессе формирования ткани / В.Н. Васильченко // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1975. — № 5. — С. 76–79.
11. Щербаков, В.П. Влияние жесткости нити на длину петли / В.П. Щербаков // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1975. — № 5. — С. 125–129.

12. Степанов, С.Г. О влиянии жесткостных характеристик нитей при изгибе и растяжении на параметры формирования ткани / С.Г. Степанов, И.И. Волков // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2007. — № 5. — С. 27–31.
13. Степанов, С.Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: дисс. ... д-р. техн. наук.: Сергей Гаевич Степанов — Иваново: ИГТА, - 2007. — 443 с.
14. Степанов, Г.В. Теория строения ткани / Г.В. Степанов, С.Г. Степанов — Иваново: ИГТА, - 2004. — 492 с.
15. Мигушов, И.И. Механика текстильной нити и ткани / И.И. Мигушов — М.: Лёгкая индустрия, 1980. — 160 с.
16. Николаи, Е.П. К задаче об упругой линии двойной кривизны / Е.П. Николаи — Петроград, 1916. — 86 с.
17. Ляв, А. Математическая теория упругости / А. Ляв — М.: ОНТИ НКТП, 1935. — 674 с.
18. Тимошенко, С.П. Механика материалов / С.П. Тимошенко, Дж. Герс — М.: Мир, 1976. — 669 с.
19. Попов, Е.П. Нелинейные задачи статики тонких стержней / Е.П. Попов — М.: Гостехиздат, 1948. — 170 с.
20. Джанелидзе, Г.Ю. Обобщенные зависимости теории тонких стержней / Г.Ю. Джанелидзе — Доклады АН СССР, 1949. — Т. 66, Вып. 4. — С. 56-75.
21. Живов, В.С. Равновесие неидеальной нити на плоской кривой / В.С. Живов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1962. — № 6. — С. 28-33.
22. Мигушов, И.И. Плоское движение упругой на изгиб нити / И.И. Мигушов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1967. — № 3. — С. 138–142.
23. Мигушов, И.И. Исследование движения нити по поверхности / И.И. Мигушов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1972. — № 6. — С. 61–65.
24. Сухарев, В.А. О распределении натяжения в жесткой нити, скользящей по цилиндрической поверхности / В.А. Сухарев // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1973. — № 2. — С. 68–72.

25. Ефремов, Е.Д. Влияние толщины нити и геометрических параметров рабочих органов машины на натяжение нити / Е.Д. Ефремов // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. — 1958. — № 6. — С. 63–67.
26. Живов, В.С. О форме нитенаправителей / В.С. Живов, И.И. Мигушов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1970. — № 2. — С. 66-70.
27. Рагоза, И.В. Теоретическое исследование влияния крутки стеклонити при изгибе на деформируемость филаментов / И. В. Рагоза // Изв. вузов. Технология легкой пром-сти. — 1972. — № 6. — С. 35–39.
28. Суслов, Н.Н. Зависимость натяжения слоя волокна от его толщины, жесткости и радиуса рабочей кромки / Н.Н. Суслов, В.И. Савиновский // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1975. — № 1. — С. 32–36.
29. Светлицкий, В.А. Стационарное движение и малые колебания нити / В.А. Светлицкий, Н.В. Гулиа // Изв. вузов. Машиностроение. — 1969. — № 9. — С. 35–39.
30. Зарецкас, С.-Г.С. Механические свойства нитей при кручении / С.-Г.С. Зарецкас — М.: Лёгкая индустрия, 1979. — 184 с.
31. Светлицкий, В.А. Нелинейные уравнения движения тонких стержней / В.А. Светлицкий, И.В. Стасенко, В.И. Габрюк // Изв. вузов. Машиностроение. — 1965. — № 2. — С. 57–67.
32. Светлицкий, В.А. Влияние изгибной жесткости на форму нити в поле центробежных сил / В.А. Светлицкий, Н.В. Гулиа // Изв. вузов. Машиностроение. — 1969. — № 9. — С. 35–39.
33. Светлицкий, В.А. Передачи с гибкой связью / В.А. Светлицкий — М.: Машиностроение, 1967. — 154 с.
34. Светлицкий, В.А. Механика гибких стержней и нитей / В.А. Светлицкий — М.: Машиностроение, - 1978. — 222 с.
35. Светлицкий, В.А. Механика трубопроводов и шлангов / В.А. Светлицкий — М.: Машиностроение, - 1982. — 280 с.
36. Джумабаев, Г.Х. . Исследование механики нити в технологическом процессе прядения на основе теории вязкоупругости / Г.Х. Джумабаев, Г.Б. Абдиева, С.А. Хамраева // Наука и мир. — 2017. — № 12-1(52). — С. 46-48.

37. Новиков, Н.Г. О строении ткани и о проектировании её с помощью геометрического метода / Н.Г. Новиков // Текстильная промышленность. — 1946. — № 2. — С. 11-12.
38. Ефремов, Е.Д. Зависимость между строением ткани и натяжением нитей основы и утка / Е.Д. Ефремов, Д.Е. Ефремов, В.А. Воронин // Новое в технике и технологии ткацкого производства: межвуз. сб. науч. тр. — Иваново, 1986. — С. 153–157.
39. Керимов, С.Г. К вопросу теории фазового строения тканых изделий / С.Г. Керимов, Е.Д. Ефремов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1978. — № 6. — С. 49–54.
40. Смирнов, В.И. Теоретическое исследование строения ткани полотняного переплетения / В.И. Смирнов — М.: Ростехиздат, - 1960. — 94 с.
41. Оников, Э.А. Расчет показателей элементов ткани полотняного переплетения в опушке: сб. науч. тр. ЦНИХБИ за 1964 г / Э.А. Оников, В.А. Светлицкий — М.: Легкая индустрия, - 1966. — С.408–418.
42. Сурнина, Н.Ф. Проектирование ткани по заданным параметрам.— М.: Легкая индустрия, - 1973 / Н.Ф. Сурнина — 142 с.
43. Дамянов, Г.Б. Строения ткани и современные методы её проектирования / Г.Б. Дамянов, И.З. Бачев, Н.Ф. Сурнина — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. — 240 с.
44. Мартынова, А.А. Строение и проектирование тканей / А.А. Мартынова, Г.Л. Слостина, Н.А. Власова — М.: РИО МГТА, 1999. — 434 с.
45. Уразов, Н.Х. Коэффициент строения ткани / Н.Х. Уразов // Текстильная промышленность. — 1988. — № 1.— С. 55–57.
46. Уразов, Н.Х. Строение и проектирование тканей / Н.Х. Уразов — Ташкент: Учитувчи, - 1971. — 39 с.
47. Knoll, A.L. The Geometry and Mechanics of the Plain — Weave Structure / A.L. Knoll // Comparison of the General Energy Method of Analysis and Previous Models of the Textile Institute. — 1979. — №5. — P. 52-55.
48. Склянников, В.П. Определение порядка фазы строения тканей полотняного переплетения экспериментальными методами / В.П. Склянников // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 1966. — № 6. — С. 23–27.

49. Склянников, В.П. О методике исследования строения тканей саржевых и других переплетений / В.П. Склянников // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1967. — № 3. — С. 12–16.
50. Склянников, В.П. Оптимизация строения и механических свойств тканей из химических волокон / В.П. Склянников — М.: Легкая индустрия, - 1974. — 168 с.
51. Склянников, В.П. Строение и качество тканей / В.П. Склянников — М.: Легкая и пищевая промышленность, - 1984. — 175 с.
52. Мигушов, И.И. Аналитическое исследование влияния изгибной жесткости основных нитей на плотность ткани по утку / И.И. Мигушов // Совершенствование техники и технологии ткацкого производства: сб. науч. тр. — Иваново, 1983.— С.24–28.
53. Ерохин, Ю.Ф. О взаимосвязи технологических параметров заправки ткацкого станка с параметрами строения ткани / Ю.Ф. Ерохин, С.Д. Николаев, П.В. Власов, В.А. Сеницын, Т.Ю. Карева // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1993. — № 1. — С. 27–29.
54. Юхин, С.С. Прогнозирование и разработка технологии изготовления высокоплотных тканей на бесчелночных ткацких станках: дис. ... докт. техн. наук: 05.19.02 / Московский текстильный институт / С.С. Юхин — М., - 1989. — 236 с.
55. Юхин, С.С. Разработка технологии выработки тканей повышенной плотности / С.С. Юхин, В.В. Гордеева // Современные технологии текстильной промышленности: сб. матер. Всеросс. научн.-техн. конф. — М.: МГТА, 1995. — С. 56–57.
56. Юхин, С.С. Расчет оптимальных параметров изготовления высокоплотных тканей / С.С. Юхин, С.А. Цыцелина // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1997. — № 2. — С. 41–43.
57. Васильева, Е.Г. Влияние натяжения нитей на параметры строения ткани / Е.Г. Васильева, Ю.Ф. Ерохин, Н.М. Сокерин, В.А. Сеницын // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1998. — № 3. — С. 44–47.
58. Степанов, Г.В. Взаимосвязь между коэффициентом фазы строения ткани и натяжением нитей / Г.В. Степанов, С.Г. Степанов // Разработка и

совершенствование технологии и оборудования ткацкого производства: сб. науч. тр. — Иваново, 1988. — С. 92–98.

59. Степанов, С.Г. Натяжение нити в ткани / С.Г. Степанов, А.Х. Салихова, Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2001. — № 6. — С. 36–40.

60. Степанов, С.Г. Натяжение нити в тканях главных переплетений / С.Г. Степанов, А.Х. Салихова, Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2002. — № 1. — С. 38–43.

61. Степанов, Г.В. Создание и технология получения технических тканей для производства композиционных материалов: дис. ... докт. техн. наук: 05.19.02 / Г. В. Степанов — М.: МТИ им. А.Н. Косыгина, — М., - 1990. — 434 с.

62. Степанов, Г.В. Математическая модель строения ткани / Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1991. — № 5. — С. 42–46.

63. Степанов, Г.В. Обобщенная математическая модель строения ткани / Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1992. — № 1. — С. 46–48.

64. Степанов, Г.В. О геометрической форме осевой линии нити в элементе ткани / Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1993. — № 5. — С. 38–41.

65. Степанов, Г.В. Геометрия осевой линии нити / Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1994. — № 6. — С. 34–36.

66. Карева, Т.Ю. Натяжение основных нитей при формировании ткани с переменным направлением осей нитей в процессе ткачества / Т.Ю. Карева // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2001. — № 3. — С. 37–41.

67. Карева, Т.Ю. Определение величины изгиба нитей основы в тканях новых структур на основе линейной теории изгиба / Т. Ю. Карева // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2002. — № 3. — С. 48–51.

68. Ерохин, Ю.Ф. К вопросу определения некоторых параметров строения ткани / Ю.Ф. Ерохин, В. А. Сеницын, Т.Ю. Карева, Хюг. Лезо // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1992. — № 6. — С. 57–59.

69. Карева, Т.Ю. Исследование параметров строения тканей различных способов формирования / Т.Ю. Карева, С.Д. Николаев — М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2004. — 86 с.
70. Карева, Т.Ю. Разработка способа получения тканей новых структур и механизмов для его реализации на ткацких станках с кулачковым зевобразовательным механизмом / Т.Ю. Карева, С.Д. Николаев — М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2003. — 68 с.
71. Карева, Т.Ю. Особенности и некоторые параметры строения кромки ткани, сформированной способом взаимодействия нитей основы между собой / Т.Ю. Карева, И.В. Сеницына, А.В. Сеницын // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2005. — № 3. — С. 46–50.
72. Карева, Т.Ю. Разработка способа, технологии изготовления тканей новых структур и исследование их строения: дис. ... докт. техн. наук: 05.19.02 / Т.Ю. Карева — М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, - 2005. — 412 с.
73. Кожевникова, Л.В. Проектирование рациональных структур однослойных тканей и прогнозирование их материалоёмкости и технологичности: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02 ИВГПУ, 2017 / Л.В. Кожевникова — 224 с.
74. Николаев, С.Д. Расчет натяжения и деформации основных и уточных нитей при деформировании нового элемента ткани / С.Д. Николаев // Вестник ИГТА. — Иваново, — 2004. — № 2. — С. 26–30.
75. Николаев, С.Д. Методы и средства исследования технологических процессов в ткачестве / С.Д. Николаев — М., - 2003. —122 с.
76. Николаев, С.Д. Компьютерное моделирование геометрических моделей строения тканей различного переплетения / С.Д. Николаев, О.М. Раченкова // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1998. — № 4. — С. 42-45.
77. Николаев, С.Д. Прогнозирование изготовления тканей заданного строения: учеб. пособие / С.Д. Николаев — М.: МТИ, 1989. — 252 с.
78. Николаев, С.Д. Исследование строения и свойств суровых и готовых тканей / С.Д. Николаев, Л.Г. Руденко // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2005. — № 1. — С. 45–48.

79. Николаев, С.Д. Теория процессов, технология и оборудование подготовительных операций ткачества / С.Д. Николаев, Р.И. Сумарукова, С.С. Юхин, П.В. Власов — М.: ЛеПГРомбытиздат, - 1993. — 192 с.

80. Николаев, С.Д. Метод проектирования углеродных тканей / С.Д. Николаев, Е.В. Евсюкова // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1995. — № 3. — С. 27–30.

81. Чистова, И.Н. Техническая ткань для производства композиционных матер / И.Н. Чистова, Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1996. — № 3. — С. 108–109.

82. Чистова, И.Н. Взаимодействие нитей в элементе ткани / И.Н. Чистова, С.Г. Степанов // Теория и практика разработки оптимальных технологических процессов в текстильном производстве: сб. матер. междунар. науч.-техн. конф. — Иваново, - 1996. — С. 122–123.

83. Чистова, И.Н. Взаимосвязь нитей основы и утка в тканях полотняного переплетения / И.Н. Чистова, С.Г. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. -1997. — № 1. — С. 44–48.

84. Степанов, С.Г. Взаимодействие нитей в тканях фундаментальных переплетений / С.Г. Степанов, А.А. Кочетов // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс –1998): сб. матер. междунар. науч.–техн. конф. — Иваново, 1998. — С. 133–134.

85. Степанов, С. Г. Элементы анализа строения тканей / С.Г. Степанов, А.А. Кочетов, Г.В. Степанов // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс – 1998): сб. матер. междунар. науч. –техн. конф. — Иваново, 1998. — С. 164.

86. Степанов, С.Г. Описание геометрии нити в ткани с помощью рядов Фурье / С.Г. Степанов, А.А. Кочетов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 1999. — № 2. — С. 56–58.

87. Степанов, С.Г. Равновесие нитей в тканях саржевого переплетения / С.Г. Степанов, Г.В. Степанов, А.Б. Евглевская // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. –2000. — № 1. — С. 53–57.

88. Степанов, С.Г. Равновесие нити в ткани / С.Г. Степанов, А.Х. Салихова, Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2000. — № 4. — С. 52–56.
89. Степанов, С.Г. Модель строения однослойной ткани / С.Г. Степанов, А.Х. Салихова, Г.В. Степанов // Совершенствование техники и технологии лёгкой промышленности: сб. науч. тр. — Иваново, 2004. — С. 98–105.
90. Степанов, С.Г. Использование степенных функций при исследовании строения тканей / С.Г. Степанов, Г.В. Степанов // Изв. вузов. Технология текст. пром-сти. — 2003. — № 5. — С. 42-46.
91. Степанов, О.С. Некоторые геометрические соотношения теории строения ткани / О.С. Степанов, В.Н. Грачев // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2009. — № 6. — С. 61-64.
92. Евсюкова, Е.В. Разработка структуры и исследование свойств углеродных тканей для композитов / Е.В. Евсюкова // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2013, — № 2. — С. 74-77.
93. Степанов, О.С. Ткань из высокомодульных технических нитей / О.С. Степанов, Н.К. Романычев, А.В. Моторин // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2009. — № 3. — С. 41-45.
94. Полякова, Л.П. Исследование влияния переплетений основных и уточных нитей на прочностные и гигиенические свойства однослойных тканей / Л.П. Полякова, Б.М. Примаченко // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2007. — № 1. — С. 77-83.
95. Иноземцева, Н.А. Расчет параметров строения тканей на ЭВМ / Н.А. Иноземцева // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2010. — № 3. — С. 24-28.
96. Гречухин, А.П. Способ построения профиля нити в ткани / А.П. Гречухин, В.Ю. Селиверстов // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2010. — № 5. — С. 52-55.
97. Керимов, С.Г. Аналитический метод проектирования и анализа структур тканей с учетом порядка фазы их строения / С.Г. Керимов // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2010. — № 8. — С. 34-40.

98. Гречухин, А.П. Трехмерная модель формы нити в однослойной ткани полотняного переплетения / А.П. Гречухин, В.Ю. Селиверстов // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2011. — № 5. — С. 62-65.
99. Гречухин, А.П. Способ построения границ профиля нити в ткани с переменной плотностью расположения нитей / А.П. Гречухин, В.Ю. Селиверстов // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2012. — № 1. — С. 46-49.
100. Толубеева, Г.И. Методика построения объемной модели однослойной ремизной ткани / Г.И. Толубеева, Н.А. Коробов // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2013, — № 1. — С. 61-66.
101. Сафонов, П.Е. Разработка облегченных структур тканей полотняного и перевивочного переплетения из полиимидных и параарамидных нитей / П.Е. Сафонов, Н.М. Левакова, С.С. Юхин // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2015. — № 2. — С. 69-73.
102. Авдусина, А.В. Исследование параметров осевой линии изгиба и величины уработки нитей основы в однослойной ткани / А.В. Авдусина, Л.В. Кожевникова, Т.Е. Грекова, Т.Ю. Карева // Изв. вузов. Технология текст. пром-ти. — 2014. — № 1. — С. 60-65.
103. Чистобородов, Г.И. Прикладные задачи нелинейной механики гибких нитей / Г.И. Чистобородов, С.Г. Степанов, Ю.А. Федоров — Иваново: ИГАСУ, 2008. — 247 с.
104. Гречухин, А.П. Математическая модель строения ткани из углеродных нитей / А.П. Гречухин // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. — 2015. — № 5. — С. 94-100.
105. Степанов, О.С. Математическая модель для расчета на прочность напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии / О.С. Степанов // Современные технологии и оборудование текстильной промышленности (Текстиль-2011): сб. матер. междунар. науч.-техн. конф. — М., 2011. — С. 110.
106. Карева, Т.Ю. Особенности строения и тенденции развития структур текстильных полотен как основы композиционных материалов / Т.Ю. Карева // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). — 2016. — № 1-2. — С. 25-30.

107. Карева, Т.Ю. . Однослойные тканые структуры ортогонального и неортогонального строения для производства композиционных материалов / / Т.Ю. Карева, И.С. Барабанщикова, Т.В. Смирнова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2020. — № 5(389). — С. 52-56.

108. Арипбаева, А. Е. Зависимость для расчета разрывного внутреннего гидравлического давления в пожарных напорных рукавах / А.Е. Арипбаева, С.Г. Степанов, Р.Т. Калдыбаев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2019. — № 1(379). — С. 186-191.

109. Арипбаева, А. Е. Оценка точности зависимости для расчета разрывного внутреннего гидравлического давления в пожарных напорных рукавах / А.Е. Арипбаева, С.Г. Степанов, Р.Т. Калдыбаев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2019. — № 1(379). — С. 191-195.

110. Сафонов, П.Е. Исследование масштабного эффекта прочности некоторых видов нитей и пряжи со специальными свойствами / П.Е. Сафонов, Н.М. Левакова, С.С. Юхин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2019. — № 2(380). — С. 72-76.

111. Щербаков, В.П. [и др.]. Изменения и дополнения в прочностных расчетах ткани с учетом масштабного эффекта и неравномерности нитей по прочности / В.П. Щербаков, Н.С. Скуланова, А.Е. Цветкова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2019. — № 2(380). — С. 186-191.

112. Калдыбаев, Р.Т. Экспериментальное определение параметров контакта между нитями в тканых армирующих каркасах пожарных напорных рукавов / / Р.Т. Калдыбаев, С.Г. Степанов, А.Е. Арипбаева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2020. — № 5(389). — С. 56-61.

113. Пирогов, Д.А. . Определение эффективных упругих характеристик композиционного материала при простых напряженных состояниях, на основе понятия жесткости / Д.А. Пирогов, Л.Б. Маслов, П.В. Королев, К.В. Клопова //

Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2021. — № 6(396). — С. 264-271.

114. Пирогов, Д.А. . Моделирование фаз строения объемной тканой структуры и их влияние на упругие свойства композиционного материала на ее основе / Д.А. Пирогов, Л.Б. Маслов, И.А. Тимофеев, Е.А. Поляничко // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2022. — № 5(401). — С. 223-228.

115. Николаев, С.Д. Разработка новых структур тканей специального назначения и прогнозирование технологий их изготовления / С.Д. Николаев // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). — 2016. — № 1-2. — С. 6-9.

116. Киселев, М.В. Экспериментальные исследования механических свойств углеродной нити в зависимости от ее ориентации в композиционном материале / М.В. Киселев, А.Б. Балашов, С.Е. Голубев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2021. — № 6(396). — С. 271-278.

117. Румянцев, Е.В. и др. Полимерные композиционные материалы на волокнистой основе: тенденции развития, характеристики, научные направления и технологии / Е.В. Румянцев, С.Г. Степанов, М.В. Киселев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2021. - № 6. - С. 14...20.

118. Михайлов, М.С. Методы изготовления волокнистых многослойных композитных шлангов повышенной износостойкости с текстильным кордом / М.С. Михайлов, А.П. Титова, С.В. Хейло, Э.П. Сариев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2023. — № 4(406). — С. 251-256.

119. Хамраева, С.А. Об одной методике определения зависимости строения ткани от натяжения нитей основы и утка / С.А. Хамраева, Г.Б. Абдиева, Н.Б. Юсупова // Integration of the Scientific Community to the Global Challenges of Our Time : Materials of the II international scientific-practical conference. In 3 volumes, Osaka, Japan, 07–09 марта 2017 года. Том I. — Osaka, Japan: Общественный фонд "Региональная Академия Менеджмента", - 2017. — С. 333-336.

120. Михайлов, М.С. Технологические методы повышения рабочего ресурса многослойной конструкции полимерного шланга повышенной износостойкости / М.С. Михайлов, А.П. Титова, Н.С. Карпов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2023. — № 6(408). — С. 247-254.
121. Жолдасова, А.Б. . Исследование фазового строения ткани / А.Б. Жолдасова, А.Д. Даминов, С.С. Рахимходжаев // Universum: технические науки. — 2024. — № 2-4(119). — С. 57-64.
122. Рудовский, П.Н. . Использование ткацких технологий для повышения эффективности средств индивидуальной бронезащиты / П.Н. Рудовский, А.П. Гречухин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2025. — № 1(415). — С. 140-145.
123. Абашкин, М.В. Получение гибких плоскостворачиваемых рукавов из термопластов / М.В. Абашкин, А.П. Михайловская // Дизайн. Материалы. Технология. — 2025. — № 1(77). — С. 124-129.
124. Ху, Х. Экспериментальные исследования реологических свойств низкотемпературной перекачки дизельного топлива по мобильным трубопроводным системам / Х. Ху, И.В. Гладков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2024. — № 3(141). — С. 69-72.
125. Ларионов, С.В. Определение показателей надежности плоскостворачиваемых трубопроводов / С.В. Ларионов, Х. Ху // Трубопроводный транспорт: теория и практика. — 2022. — № 2(82). — С. 34-36.
126. Рыбаков, Ю.Н. Способы и технологии создания нового поколения средств хранения и транспортирования горючего / Ю.Н. Рыбаков, С.Н. Волгин // Химия и технология топлив и масел. — 2020. — № 6(622). — С. 28-34.
127. Рыбаков, Ю.Н. Модернизация средств хранения и транспортирования горючего на основе новых композиционных материалов / Ю.Н. Рыбаков, С.Н. Волгин, Р.И. Кюннап // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2025. — № 4-5. — С. 39-44.
128. Рыбаков, Ю.Н. Научное обоснование модернизации средств хранения и транспортирования горючего на основе новых композиционных материалов /

Ю.Н. Рыбаков, С.Н. Волгин, Р.И. Кюннап // Химия и технология топлив и масел. — 2025. — № 3(649). — С. 37-42.

129. Рыбаков, Ю.Н. Технология изготовления напорных плоскостворачиваемых рукавов для горючего с использованием модифицированных полимерных материалов / Ю.Н. Рыбаков, С.Н. Волгин // Технологии нефти и газа. — 2021. — № 2(133). — С. 55-60.

130. Корнев, В.А. Технические требования к напорным рукавам для перекачивания нефтепродуктов / В.А. Корнев, Ю.Н. Рыбаков, О.Е. Волков, А.А. Колесников // Проблемы современной науки и образования. — 2016. — № 14(56). — С. 29-31.

131. Корнев, В.А. Композиционные полимерные материалы для технических средств нефтепродуктообеспечения / В.А. Корнев, Ю.Н. Рыбаков // European Research. — 2015. — № 8(9). — С. 28-30.

132. Волков, О.Е. Перспективные рукава для технических средств перекачки горючего / О.Е. Волков, В.А. Корнев, А.А. Колесников // Наука, техника и образование. — 2015. — № 7(13). — С. 8-13.

133. Корнев, В.А. Перспективы применения термопластичных полиуретанов в технических средствах нефтепродуктообеспечения / В.А. Корнев, Ю.Н. Рыбаков, О.Д. Харламова, С.И. Чириков // Наука, техника и образование. — 2015. — № 3(9). — С. 27-32.

134. Корнев, В.А. Конструкция многослойных топливостойких эластичных оболочек / В.А. Корнев, Ю.Н. Рыбаков, А.А. Колесников, И.Д. Асметков // Наука, техника и образование. — 2015. — № 4(10). — С. 74-77.

135. Рыбаков, Ю.Н. Вопросы использования термопластичных рукавов для нефтепродуктов в условиях холодного климата / Ю.Н. Рыбаков, О.Д. Харламова, С.И. Чириков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2014. — № 206. — С. 107-110.

136. Рыбаков, Ю.Н. Технические средства нефтепродуктообеспечения из конструкционных материалов на основе термопластичных полиуретанов / Ю.Н. Рыбаков, В.А. Корнев, О.Д. Харламова, С.И. Чириков // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. — 2016. — № 57. — С. 396-402.

137. Рыбаков, Ю.Н. Эластичные рукава для установок перекачивания горючего и протяженных трубопроводов / Ю.Н. Рыбаков, В.А. Корнев, О.Е. Волков, О.Д. Харламова // Знание. — 2015. — № 11-1. — С. 22-26.

138. Рыбаков, Ю.Н. Технические требования и методы оценки эластичных резервуаров и напорных плосковорачиваемых рукавов из композиционных полимерных материалов для арктических условий / Ю.Н. Рыбаков, Р.И. Кюннап // 60 лет химмотологии — основные итоги и направления развития : Сборник трудов I Всероссийской научно-технической конференции. — Москва : ФАУ "25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России", - 2024. — С. 273-275.

139. Харламова, О.Д. Термопластичные рукава для применения в условиях Арктики и Крайнего Севера / О.Д. Харламова, Ю.Н. Рыбаков // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. — 2016. — № 57. — С. 442-448.

140. Тимофеев, В.Д. Вопросы применения полевых трубопроводов при тушении лесных пожаров в Якутии / В.Д. Тимофеев, Д.С. Егоров // Технологии техносферной безопасности. — 2020. — № 2(88). — С. 99-109.

141. Демиров, В.И. ГИБКИЙ ТРУБОПРОВОД. Применение плосковорачиваемых рукавов для преодоления водной преграды / В.И. Демиров, В.С. Ивагин, И.Р. Габдрашитов // Материально-техническое обеспечение Вооружённых Сил Российской Федерации. — 2023. — № 10(46). — С. 56-61.

142. Артюхов, Ю.О. Мобильная трубопроводная система на основе полиуретановых плосковорачиваемых рукавов / Ю.О. Артюхов // Химическая техника. — 2017. — № 4. — С. 26-28.

143. Бельский, С.Г. Технология транспорта нефти и нефтепродуктов с применением гибких трубопроводов для оперативного снабжения в чрезвычайных ситуациях / С.Г. Бельский, М.Ю. Земенкова, Ю.Д. Земенков // Нефтегазовый терминал : Материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 07–08 ноября 2023 года. — Тюмень: Тюменский индустриальный университет, - 2023. — С. 133-137.

144. Новиков, С.Г. Перспективы применения гибких плосковорачиваемых трубопроводов из композиционных материалов / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин // Провинциальные научные записки. — 2020. — № 1(11). — С. 61-65.

145. Дремин, А.В. Особенности испытания рукавов диаметром более 150 мм / А.В. Дремин, А.Д. Семенов, А.Н. Бочкарев // Пожарная и аварийная безопасность : сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, посвященной проведению в Российской Федерации Года науки и технологий в 2021 году и 55-летию учебного заведения, Иваново, 10–11 ноября 2021 года. — Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», - 2021. — С. 275-279.

146. Словииков, С.В. Методика исследования зависимости механических свойств полиуретановых изделий от температуры / С.В. Словииков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 2. — С. 177-189.

147. Яковлев, С.Н. Экспериментальное определение предельной температуры конструкционных полиуретанов, работающих в условиях динамического нагружения / С.Н. Яковлев // Вестник машиностроения. — 2017. — № 7. — С. 66-70.

148. Яковлев, С.Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов / С.Н. Яковлев // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). — 2013. — № 20(46). — С. 078-080.

149. Корнев, В.А. Аналитический расчет напорных рукавов методом гибкой нити / В.А. Корнев // Проблемы современной науки и образования. — 2016. — № 30(72). — С. 22-26.

150. Абашкин, М.В. Способы увеличения прочности связи между полиуретановым слоем и полиэфирным тканым каркасом плоскостворачиваемого рукава / М.В. Абашкин // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. — 2024. — № 1. — С. 48-51.

151. Андреев, В.М. Особенности изменения диаметра плоскостворачиваемого рукава под воздействием гидростатического давления / В.М. Андреев, Н.М. Эсмонтов, А.В. Сычевский // Моделирование и ситуационное

управление качеством сложных систем: Пятая Всероссийская научная конференция. Сборник докладов, Санкт-Петербург, 18 апреля 2024 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, - 2024. — С. 83-88.

152. Корнев, В.А. Продольные и кольцевые нагрузки в напорных полимерных рукавах / В.А. Корнев, Ю.Н. Рыбаков // Проблемы современной науки и образования. — 2016. — № 39(81). — С. 12-14.

153. Корнев, В.А. Внутренние нагрузки в напорных плосковорачиваемых рукавах при перекачке нефтепродуктов / В.А. Корнев, Ю.Н. Рыбаков // European research: innovation in science, education and technology : XXXVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE, London, 15–16 января 2018 года. — London: PROBLEMS OF SCIENCE, 2018. — С. 6-8.

154. Новиков, С.Г. Расчет гибких эластичных оболочек из полимерных материалов / С.Г. Новиков, Р.В. Глаголев, В.В. Малыхин, С.А. Сергеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2014. — № 1. — С. 78-85.

155. Новиков, С.Г. Инженерные методы расчетов гибких плосковорачиваемых трубопроводов из композиционных материалов с учетом их веса / С.Г. Новиков, В.Н. Куценко, В.В. Малыхин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2017. — Т. 7, № 3(24). — С. 139-146.

156. Бахарев, Б.А. Мобильные плосковорачиваемые трубопроводные системы: расчет, проектирование / Б.А. Бахарев, С.Г. Степанов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX–2017): сб. матер. XIX междунар. науч.-техн. форума. — Иваново, 2017. — С. 78-80.

157. Степанов, С.Г. Мобильные плосковорачиваемые трубопроводные системы на основе композитов из синтетических нитей и уретановых связующих: назначение, устройство, проблемы проектирования и изготовления / С.Г. Степанов, Б.А. Бахарев // Ключевые тренды в композитах: наука и технологии: сб. матер. междунар. конференции по композитам / МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., - 2019, - С. 713-719.

158. Степанов, С.Г. Назначение, характеристики, конструкции, проблемы расчета, проектирования и изготовления мобильных плоскостворачиваемых трубопроводных систем на основе композитов из тканых армирующих каркасов и полиуретановых связующих / С.Г. Степанов, Б.А. Бахарев // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: сб. материалов XVI междунар. науч.-практ. конференции. — Нальчик: Изд-во «Принт Центр», - 2020, - С. 421-425.

159. Моторин, Л.В. Математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии / Л. В. Моторин, О. С. Степанов, Е. В. Братолобова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2010. - №8. - С. 103-109;

160. Моторин, Л.В. Упрощенная математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии / Л.В. Моторин, О.С. Степанов, Е.В. Братолобова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2011. - №1. - С. 126-133;

161. Арипбаева, А.Е. Исследование характеристик тканых армирующих каркасов напорных пожарных рукавов и их влияния на величины внутренних разрывных давлений / А.Е. Арипбаева, Ж.У. Мырхалыков, Р.Т. Калдыбаев, О.И. Койфман, Ю.М. Базаров, С.М. Степанова, С.Г. Степанов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. — 2020. — Т. 63, Вып. 10. — С. 96-104.

162. Арипбаева, А.Е. Методика расчета и рационального проектирования армирующих каркасов напорных пожарных рукавов на основе синтетических нитей / А.Е. Арипбаева, Ж.У. Мырхалыков, О.И. Койфман, Ю.М. Базаров, С.Г. Степанов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. — 2016. — Т. 59, Вып. 10. — С. 83-87.

163. Арипбаева, А.Е. Перспективное направление в области расчета и проектирования армирующих каркасов напорных пожарных рукавов на основе синтетических нитей / А.Е. Арипбаева, Ж.У. Мырхалыков, О.И. Койфман, Ю.М. Базаров, С.Г. Степанов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. — 2016. — Т. 59, Вып. 7. — С. 92-95.

164. Арипбаева, А.Е. Развитие теории, разработка методов расчета и проектирования тканых армирующих каркасов пожарных напорных рукавов.

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). Республика Казахстан. Шымкент. 2018. 159 с / А. Е. Арипбаева

165. Арипбаева, А.Е. Исследование зависимости разрывного внутреннего гидростатического давления пожарных напорных рукавов от параметров их тканого армирующего каркаса / А.Е. Арипбаева, Ж.У. Мырхалыков, С.Г. Степанов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX–2016): сб. матер. XIX междунар. науч.-техн. форума. — Иваново, 2016. — С. 238-240.

166. Арипбаева, А.Е. Методика рационального проектирования тканых армирующих каркасов напорных пожарных рукавов / А.Е. Арипбаева, Ж.У. Мырхалыков, С.Г. Степанов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX–2016): сб. матер. XIX междунар. науч.-техн. форума. — Иваново, 2016. — С. 235-237.

167. Степанов, О.С. Исследование влияния различных факторов на прочность напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии / О.С. Степанов, Е.В. Братолобова, А.А. Широков // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2012. — № 4. — С. 105–108.

168. Расчет и проектирование гибких плосковорачиваемых 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.

169. Степанов, С.Г. Развитие теории, разработка метода расчета гибких плосковорачиваемых рукавов при действии внутреннего давления / С.Г. Степанов, Д.А. Буланов, О.А. Додонов, С.М. Степанова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2024. - № 4 - С. 234 –245.

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

171. Буланов Д.А. Гибкие плоскостворачиваемые 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.

172. Буланов, Д. А. Гибкие плоскостворачиваемые 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.

173. 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.

174. 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.

175. Степанов, О.С. Применение теории строения ткани для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии: диссертация ... кандидата технических наук : 05.19.02 Иваново 2012 / О.С. Степанов

176. Тарасов-Агалаков, Н.А. Практическая гидравлика в пожарном деле / Н.А. Тарасов-Агалаков — М.: Издательство министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1959. — 134 с.
177. Бидерман, В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика / В.Л. Бидерман — М., 1977. — 488 с.
178. 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.
179. Композиционные материалы: Справочник / под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. М.:Машиностроение, 1990. 515 с.
180. Берендеев, Н.Н. Описание поведения тканого композита при статическом нагружении с использованием структурной модели / Н.Н. Берендеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2013. - № 4 (4). - С.173-179.
181. Берендеев, Н.Н. Структурная модель гибкого тканого композита / Н.Н. Берендеев, Д.А. Кожанов, А.К. Любимов // Проблемы прочности и пластичности. - 2015. - Т. 77, № 2. - С.162-171.
182. Круклиньш, А.А. Структурная теория пластиков, армированных тканями. Диссертация кандидата технических наук. Рига: Риж. политехн. ин-т. - 1985. - 180 с.
183. Круклиньш, А.А. Структурные критерии прочности тканевых пластиков / А.А. Круклиньш // Механика композитных материалов. Рига: Риж. политехн. ин-т. - 1984 - С. 57-74.
184. Edgren, F. Approximate analytical constitutive model for non-crimp fabric composites / F. Edgren, L.E. Asp // Composites:Part A. - 2005. - V.36. - P. 173-181.
185. Naik, R.A. Analysis of woven and braided fabric reinforced composites / R.A. Naik — NASA CR-194930. - 1994. - P. 46.
186. Naik, R.A. Failure analysis of woven and braided fabric reinforced composites / R.A. Naik — NASA CR-194981. - 1994. - P. 47.

187. Дмитриенко, Ю.И. и др. Моделирование поверхностей прочности композитов на основе микроструктурного конечно-элементного анализа / Ю.И. Дмитриенко // Наука и образование. - 2012. - № 11. - С.487-496.
188. Lomov, S.V. Model of internal geometry of textile composite reinforcements: Data structure and virtual reality implementation / S.V. Lomov, T. Mikolanda, M. Kosek, I. Verpoest // Journal of the Textile Institute. 2007. - V. 98. - No. 1. - P. 1-13.
189. Verpoest, I. Virtual textile composites software Wisetex: integration with micromechanical, permeability and structural analysis / I. Verpoest, S.V. Lomov // Composites Science and Technology. - 2005. - V. 65. - P. 2563-2574.
190. Буланов Д.А. Зависимости для прочностного расчета гибких плоскостворачиваемых рукавов при действии внутреннего давления жидкости / (SMARTEX) – 2025. – С. 19-24.
191. Степанов, С.Г. Прочностной расчет гибких плоскостворачиваемых рукавов при действии внутреннего гидростатического давления / С.Г. Степанов, Д.А. Буланов, О.А. Додонов, Ю.С. Кабанова, С.М. Степанова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2024. - № 5 – С. 231-239.
192. ГОСТ Р 51049-97. Техника пожарная. Рукава пожарные напорные. Общие технические требования. Методы испытаний. – Москва: Издательство стандартов, 1997. – 15 с.
193. Шланги для прокачки нефти, нефтепродуктов и нефтесодержащих вод BF OFFSHORE OIL. Технические условия ТУ 2557-003-11104843-2016. ООО «БАЛТИКФЛЕКС», Санкт-Петербург, 2016.
194. Степанов, С.Г. Проверка соответствия расчетных и экспериментальных значений разрывных гидравлических давлений в гибких плоскостворачиваемых рукавах / С.Г. Степанов, Д.А. Буланов, О.А. Додонов, Ю.С. Кабанова, С.М. Степанова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2025. — № 1.- С. 268-274.
195. Datta, J. Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers / J. Datta // J. of Elastomers and Plastics, 2010. - V. 42. - P. - 117-127.

196. ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе. – Москва: Издательство стандартов, 1981. – 12 с.
197. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Издательство стандартов, 1980. – 15 с.
198. ГОСТ 14359-69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования. – Москва: Издательство стандартов, 1969. – 10 с.
199. ГОСТ 34376.1-2017. Пластмассы. Термопластичные полиуретаны для формования и экструзии. Часть 1. Система обозначения. - Москва: Стандартиформ, 2017. - 12 с.
200. ГОСТ 6611.2-73. Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки. – Москва: Издательство стандартов, 1973. - 8 с.
201. Пискунов, Е.Ю. Модификация коэффициента Тэйла / Е.Ю. Пискунов // Известия Иркутской государственной экономической академии. - 2012. - № 5. - С.156-161.
202. 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.
203. 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».

## ПРИЛОЖЕНИЕ А – Исходные данные

Таблица А.1 - Исходные данные для расчета и проектирования ПГР

№	Номинальный диаметр DN, мм	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
Плосковорачиваемые гибкие рукава									
1	100	1,57	2,12	2,05	2,46	4,14	0,60	0,66	1,67
2	150	2,30	3,14	2,96	4,69	7,03	0,62	0,69	1,61
3	150	2,32	4,50	3,07	7,14	7,56	0,59	0,63	1,69
4	150	2,40	3,85	2,53	5,33	7,09	0,57	0,61	1,75
5	400	2,12	2,00	2,63	3,48	5,87	0,55	0,77	1,82
Пожарные напорные рукава									
6	150	2,00	2,00	2,02	2,97	3,65	0,558	0,559	1,79
7	89	1,80	1,60	1,82	2,63	3,21	0,545	0,549	1,83
8	77	1,35	1,45	1,09	2,38	2,55	0,532	0,528	1,88
9	66	1,20	1,30	1,07	2,15	2,39	0,543	0,540	1,84
10	51	1,20	1,35	1,09	2,14	2,41	0,553	0,545	1,81

№	Номинальный диаметр DN, мм	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	Линейная плотность нити основы	Линейная плотность нити утка
Плосковорачиваемые гибкие рукава										
1	100	1,52	3,20	3,070	9,35	18,5	425	892	550	1400
2	150	1,45	3,11	3,016	4,74	19,5	1745	3232	3250	6000
3	150	1,59	3,11	3,008	4,74	18,0	1745	6425	3250	12350
4	150	1,64	3,11	3,012	4,74	17,6	1890	5411	3250	9050
5	400	1,30	3,16	120,0	4,74	4,5	1477	2218	2750	4500
Пожарные напорные рукава										
6	150	1,79	2,90	2,90	3,20	17,2	795	795	1480	1480
7	89	1,82	2,77	2,95	3,20	15,8	645	505	1200	940
8	77	1,89	2,93	3,15	3,20	13,1	363	429	680	800
9	66	1,84	3,06	3,07	3,20	13,0	287	356	540	670
10	51	1,83	3,05	3,10	3,20	12,2	286	335	540	630

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Программа для расчета

Свидетельство. № 2026615706, 27.02.2026 Программа для расчета разрывных внутренних гидростатических давлений в плосковорачиваемых гибких рукавах. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614492. 2026./ Кабанова Ю.С., Додонов О. А., Буланов Д. А., Степанов С. Г.

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
№ 2026615706

**Программа для расчета разрывных внутренних гидростатических давлений в плосковорачиваемых гибких рукавах**

Правообладатель: **Акционерное общество "ИВХИМПРОМ" (RU)**

Авторы: **Кабанова Юлия Сергеевна (RU), Додонов Олег Альбертович (RU), Буланов Дмитрий Андреевич (RU), Степанов Сергей Гаевич (RU)**

Заявка № **2026614492**  
Дата поступления **24 февраля 2026 г.**  
Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **27 февраля 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

Документ подписан электронной подписью  
Сертификат 66e578ed71c48521648018e75f25906  
Подписчик: Зубов Юрий Сергеевич  
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.2026

## ПРИЛОЖЕНИЕ В - Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ  
 Первый заместитель генерального  
 директора АО «ИВХИМПРОМ»  
 /Хахин С.Н.  
 «15» декабря 2025 г.



**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Буланова Дмитрия Андреевича на тему: «Разработка методики расчета и проектирования плосковорачиваемых гибких рукавов при действии внутреннего гидростатического давления»

Мы нижеподписавшиеся, заместитель генерального директора по техническим вопросам АО «ИВХИМПРОМ» Рябов М.Ю., заместитель начальника участка № 7 по производству плосковорачиваемых гибких рукавов Родионов Г.А. с одной стороны и автор диссертационной работы Буланов Д.А. и его научный руководитель д.т.н., доцент Степанов С.Г. с другой стороны, составили настоящий акт, который подтверждает, что с 2024 года и по настоящее время используются результаты диссертационного исследования Буланова Д.А., в том числе разработанная методика расчета и проектирования плосковорачиваемых гибких рукавов, для создания новых образцов данных технических изделий, обладающих оптимальными параметрами и рациональной материалоемкостью и соответствующих требованиям ГОСТ Р 58714-2019.

От АО «ИВХИМПРОМ»

Заместитель генерального директора по техническим вопросам  /Рябов М.Ю. «15» декабря 2025 г.	Автор работы  /Буланов Д.А. «15» декабря 2025 г.
Заместитель начальника участка № 7  /Родионов Г.А. «15» декабря 2025 г.	Научный руководитель  /Степанов С.Г. «15» декабря 2025 г.