

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт конструкционных  
материалов на основе графита «НИИГрафит»

На правах рукописи



Панин Михаил Иванович

**Разработка технологических процессов создания армирующих структур  
полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов на базе  
мотальных паковок**

Специальность 2.6.16 - Технология производства изделий текстильной и легкой  
промышленности

Диссертация  
на соискание ученой степени доктора технических наук

Москва - 2025

## Оглавление

|                                                                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b>                                                                                                                               | <b>6</b>  |
| <b>Глава 1. Анализ процессов армирования полимерных композиционных материалов, с использованием текстильных технологий .....</b>                    | <b>17</b> |
| 1.1. Виды текстильных материалов и технологий, применяемых при изготовлении композитов в качестве наполнителей.....                                 | 19        |
| 1.2. Армирование композитов с использованием текстильных волокон.....                                                                               | 21        |
| 1.3. Нетканые полотна, применяемые при армировании полимерных композиционных материалов .....                                                       | 24        |
| 1.4. Нити и нитевидные материалы, как композиты и наполнители композиционных материалов .....                                                       | 28        |
| 1.5. Трикотаж, как наполнитель композиционных материалов.....                                                                                       | 34        |
| 1.6. Ткани в структуре композиционных материалов.....                                                                                               | 36        |
| 1.7. Армирование композиционных материалов намоткой нитей, или нитевидными материалами.....                                                         | 41        |
| Выводы по главе 1 .....                                                                                                                             | 48        |
| <b>Глава 2. Исследование структур намоток мотальных паковок и возможности использования их в качестве наполнителей композиционных материалов ..</b> | <b>51</b> |
| 2.1. Анализ существующих структур намоток мотальных паковок, применяемых при армировании композиционных материалов .....                            | 52        |
| 2.2. Структуры сомкнутых намоток.....                                                                                                               | 59        |
| 2.3. Структуры замкнутых (разомкнутых) намоток.....                                                                                                 | 70        |
| 2.4. Спиралевидные структуры намоток .....                                                                                                          | 80        |
| 2.5. Структуры 3D намоток мотальных паковок .....                                                                                                   | 87        |
| 2.5.1. Методика формирования прецизионных структур 3D намоток .....                                                                                 | 88        |

|                                                                                                                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.5.2. Условия и технологические особенности формирования прецизионных структур 3D намоток.....                                                             | 91         |
| 2.5.3. Процесс формирования прецизионных структур 3D намотки из двух и более систем нитей различной линейной плотности .....                                | 97         |
| 2.5.4. Методы построения разверток на плоскость 3D намоток .....                                                                                            | 103        |
| 2.5.5. Анализ структур 3D намоток и параметров, влияющих на их прочностные характеристики .....                                                             | 108        |
| 2.5.6. Расчет коэффициентов заполнения объема 3D намотки нитями базовой и перевивочных структур.....                                                        | 120        |
| 2.5.7. Расчет коэффициента жесткости 3D намотки .....                                                                                                       | 126        |
| 2.5.8. Расчет коэффициента связности 3D намотки.....                                                                                                        | 128        |
| Выводы по главе 2 .....                                                                                                                                     | 131        |
| <b>Глава 3. Исследование факторов, оказывающих влияние на структуру наполнителей композиционных материалов, формируемых на базе мотальных паковок .....</b> | <b>134</b> |
| 3.1. Исследование влияния угла скрещивания витков на структуру цилиндрических армирующих оболочек, формируемых параллельной намоткой .....                  | 134        |
| 3.2. Исследование влияния угла скрещивания витков на структуру цилиндрических армирующих оболочек, формируемых крестовой намоткой.                          | 139        |
| 3.3. Исследование влияния угла скрещивания витков на структуру оболочек имеющих криволинейную поверхность, формируемых крестовой намоткой..                 | 140        |
| 3.4. Исследование влияния степени прессования на структуру замкнутых 3D намоток .....                                                                       | 147        |
| Выводы по главе 3 .....                                                                                                                                     | 149        |

## **Глава 4. Исследование процессов формирования наполнителей композиционных материалов, формируемых на базе мотальных паковок произвольной формы ..... 151**

4.1. Исследование закономерности движения раскладчика нити при армировании намоткой паковок произвольной формы..... 151

4.2. Определение величины угла поворота мотальной паковки при образовании на ней заданной формы намотки..... 157

4.3. Разработка методов проектирования мотальных механизмов для создания паковок заданной формы на цилиндрических оправках ..... 160

4.4. Разработка конструкции и исследование механизма раскладки нити для формирования мотальных паковок заданной кривизны..... 179

Выводы по главе 4 ..... 185

## **Глава 5. Исследование процессов армирования композиционных материалов с помощью разверток намоток мотальных паковок ..... 187**

5.1. Исследование структур намотки мотальных паковок, используемых при армировании композиционных материалов с помощью их разверток на плоскость.....188

5.2. Особенности расчёта раскроя для выкладки развёрток намотки цилиндрической и конической формы ..... 191

5.3. Исследование прочностных характеристик армирующих структур, формируемых на базе намоток мотальных паковок с помощью разверток ..... 198

Выводы по главе 5 ..... 206

## **Глава 6. Разработка технологии армирования полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов с использованием намоточных структур..... 208**

|                                                                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.1. Разработка технологии производства тормозных дисков на базе УУКМ формируемых намоткой на прецизионных мотальных машинах.....                     | 210        |
| 6.2. Разработка технологии формирования слоисто-каркасных намоток, как основы армирования композиционных материалов конструкционного назначения ..... | 221        |
| 6.3. Разработка технологии армирования волокнистых полимерных композиционных фильтров для очистки и обеззараживания воздуха .....                     | 230        |
| 6.4. Перспективные направления развития новых технологий армирования композиционных материалов, в том числе с применением структур 3D намотки .....   | 242        |
| 6.5. Новая технология получения углерод - углеродных материалов методом построения разверток намоток на плоскость.....                                | 245        |
| Выводы по главе 6 .....                                                                                                                               | 249        |
| <b>Общие выводы и рекомендации .....</b>                                                                                                              | <b>251</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>                                                                                                          | <b>256</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>                                                                                                                              | <b>267</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>                                                                                                                              | <b>279</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>                                                                                                                              | <b>281</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>                                                                                                                              | <b>288</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....</b>                                                                                                                              | <b>296</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....</b>                                                                                                                              | <b>300</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....</b>                                                                                                                              | <b>306</b> |

## Введение

### Актуальность диссертационной работы.

Вызовы времени требуют инновационного развития промышленности страны и, в первую очередь, разработки новых видов конструкционных композиционных материалов, применяемых в различных областях промышленности.

Следует отметить, что в 1980-е годы СССР занимал третье место в мире по производству и потреблению композиционных материалов. Сейчас российский рынок композитов составляет около 1 % мирового.

В 1990-е композитное производство в России практически исчезло. Ситуация стала меняться лишь в последнее десятилетие: модернизируются заводы советской эпохи, растет спрос на углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). За последнее время ГК «Росатом» открыл производство углеволокна, ПАН-прекурсора, сформировав единственную в СНГ и Восточной Европе полную технологическую цепочку по углекомпозитам. Но безусловно в данной отрасли есть области, где зависимость от импорта критическая. Кроме того, слабо развиты отечественные технологии формирования высокопрочных армирующих структур полимерных и УУКМ, устойчивых к высоким температурам и внешним нагрузкам, а в сегменте термореактивных эпоксидных смол доля зарубежных поставок базовых компонентов превышает 95%.

В настоящее время лидерами мирового рынка композиционных материалов являются следующие фирмы: японские Toray Industries и Teijin, американская Hexcel, немецкая SGL Carbon. Эти фирмы вкладывают большие средства в новые разработки и цифровизацию. В 2019–2021 годы только на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы эти компании потратили 3,5 млрд. долларов.

По данным исследования компании JEC Group, в 2021 году объем мирового рынка композиционных материалов и изделий из них составил 12,1 млн. т (100 млрд. долларов). 50% потребления приходится на две ключевые отрасли —

строительство (27%) и транспорт (23%). За ними следует электронная промышленность (17%) и энергетика (13%). Регионы — лидеры по потреблению композитов — Азия (49%), Северная Америка (25%) и Европа (19%). Эксперты прогнозируют, что в 2026 году объем мирового рынка композиционных материалов и изделий из них вырастет до 15,5 млн. т.

Чтобы нивелировать отставание, 18 июля 2023 года Правительство РФ подписало распоряжение, утверждающее комплексную научно-техническую Программу полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства». Главная цель программы – добиться технологического лидерства страны за счет создания передовых технологий производства композиционных материалов и изделий из них. Важно отметить, что применение отечественных композиционных материалов позволит повысить конкурентоспособность ключевых отраслей, прежде всего космоса, судо- и авиастроения, автопрома, транспортного сектора, энергетики, строительного комплекса. В соответствии с разработанной программой эти риски для атомной, авиакосмической, строительной, нефтегазовой и других стратегических отраслей должны быть к 2027 году нивелированы.

Основная задача развития данных направлений состоит в расширение производств конструкционных материалов различного назначения, а именно, совершенствования существующих структур армирования и технологических процессов их изготовления. Разработка технологий создания композиционных материалов с использованием технического текстиля, способных по свойствам и качественным показателям заменить металлы и керамику является одной из задач, решаемых в рамках Программы. В связи с этим настоящая диссертация представляется актуальной.

Особенностью данной работы является проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований, а также практическая реализация наработок в производственных процессах, армирования полимерных и

углерод-углеродных композиционных материалов, с использованием мотальных паковок.

Разработанные намоточные структуры 3D намоток, могут использоваться в качестве базовых, не только при производстве цельных композитов, но также при создании новых конструкционных композиционных материалов, выпускаемых на базе их разверток намоток на плоскость.

Композиционные материалы различного назначения, формируемые на базе различных текстильных технологий, позволяют создавать не только отдельные элементы конструкций с максимальным заполнением объёмов наполнителем, но и цельные изделия с наперед заданными свойствами, требуемой формы и типоразмеров. Особенно актуально использование композиционных материалов в авиационной, судостроительной, атомной энергетике и ряде других критических отраслях. В настоящее время, для нашей страны, это стало приоритетной задачей, успешное решение которой обеспечивает её национальную безопасность. Создание новых видов летательных аппаратов, (в том числе беспилотных), самолетов, морских судов, надводного и подводного флота, разработка отдельных узлов и элементов машин, с использованием полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов. В данных композитах, вне зависимости от вида связующего и способа формования, решающую роль играют армирующие структуры текстильных материалов и используемые технологии, которые позволяют придать конечному выходному продукту новые свойства, повысить прочность и надежность в эксплуатации, технологичность и серийность изготовления. Разработка новых технологий армирования и изготовления композитов, с использованием технического текстиля, должна обеспечивать снижение их себестоимости. Именно по пути создания новых технологий производства композиционных материалов идут специалисты текстильщики и машиностроители за рубежом. Разработка рациональных структур армирующих компонентов композитов, с применением для их формирования коротких технологий и минимального парка технологического оборудования, также является

актуальной задачей. Что обусловлено, не только с точки зрения сокращения технологического цикла производства конечного продукта, при сохранении прочностных свойств, используемых нитей, но и с точки зрения ресурсосбережения (экономии дорогостоящего сырья, снижения энерго и трудозатрат), и, как следствие, снижение себестоимости выпускаемой продукции.

Следует отметить, что для создания новых конструкционных материалов на базе композитов необходимы совместные усилия специалистов химиков, технологов, материаловедов, IT-технологий и даже управленческого аппарата, чтобы обеспечивать быстрое внедрение результатов разработок в реальное производство.

На основании выше изложенного следует констатировать, что разработка новых технологий армирования и производства конструкционных композиционных материалов различного назначения, в том числе УУКМ, с максимальным заполнением объемов композита армирующим компонентом (наполнителем), является актуальной и требующей безотлагательного решения задач.

**Степень разработанности темы исследования.** Современные теоретические положения по разработке процессов формирования мотальных паковок и исследованию их структур, в том числе используемых в качестве армирующих наполнителей композиционных материалов, опубликованы в трудах Образцова И.Ф., Перепелкина К.Е., Труевцева А.В., Рокотова Н.В., Гордеева В.А., Зайцева В.П., Ефремова Е.Д., Прошкова А.Ф., Андросова В.Ф., Сухарева В.А., Гречухина А.П., Рудовского П.Н. и др. Проведенный анализ научно-исследовательских работ по данной тематике, позволил выявить актуальные проблемы в части совершенствования технологий армирования полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов, с использованием мотальных паковок, а также определить пути их совершенствования, с целью создания новых

высокопрочных конструкционных композиционных материалов, устойчивых к воздействию высоких температур и внешних нагрузок при их эксплуатации.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является развитие теории формирования мотальных паковок и создание на ее основе технологии получения армирующих структур для композиционных материалов на базе 3D намоток, устойчивых к сдвигу и расслоению в экстремальных условиях эксплуатации.

Для реализации указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- проведен анализ структур армирующих намоток и факторов, оказывающих влияние на их качественные показатели, а также возможность использования их в качестве наполнителей композиционных материалов различного назначения;
- установлены параметры формирования специальных структур намоток, таких как сомкнутые, замкнутые, спиралевидные, а также предложены принципиально новые структуры – 3D намотки и параметры их формирования;
- теоретически обоснованы условия формирования прецизионных структур 3D намоток из двух и более систем нитей различной линейной плотности;
- разработан ряд новых показателей, характеризующих структуру и свойства 3D намоток;
- проведены экспериментальные исследования влияния основных факторов - угла скрещивания витков, натяжения нити и степени прессования намотки на структуру армирующих оболочек, формируемых намоткой;
- установлены закономерности движения нитераскладчика вдоль образующей паковки в течение всего процесса формирования заготовки, исключаящие искажения формы намотки за счет изменения величины «свободного отрезка нити» между нитераскладчиком и точкой входа нити на паковку;
- разработана и запатентована конструкция механизма раскладки нити для формирования мотальных паковок с заданной кривизной поверхности;

- обоснована возможность армирования композиционных материалов плоской формы с помощью разверток намоток;
- разработана технология получения разверток углерод-углеродных композиционных материалов, используемых в качестве конструктивных элементов и нагревателей высокотемпературного оборудования;
- разработана технология производства заготовок углерод-углеродных фрикционных материалов на модернизированных прецизионных мотальных машинах.

**Объектом исследования являются** мотальные паковки различных структур и текстильные композитные изделия, формируемые на их основе.

**Предметом исследования являются** технологии армирования полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов намоткой нитей различной природы на паковки заданной формы и типоразмеров.

**Научная новизна** заключается в развитии теоретических основ процессов формирования структур 3D намоток, применяемых при армировании полимерных и УУКМ и создании технологии их получения.

В диссертации впервые:

- разработаны новые 3D намотки нитей в мотальные паковки, структура которых устойчива к сдвигу и расслоению нитей при работе конечных изделий в экстремальных условиях;
- разработаны теоретические основы расчетов прочностных характеристик армирующих заготовок, формируемых на базе 3D намоток, а именно коэффициентов объёмного заполнения, жесткости и связности структур;
- теоретически установлено влияния натяжения нитей на структуру намотки, при армировании композиционных материалов;
- разработан способ создания намоткой толстостенных плоских текстильных полотен заданной 3D структуры, используемых в качестве армирующих наполнителей композитов, формируемых на базе разверток намотки на плоскость;

- проведен теоретический расчет прочностных характеристик полимерных композитов в виде цилиндрических оболочек, армированных намоточными структурами;
- разработаны способы армирования полимерных композиционных материалов, формируемых на базе мотальных паковок различных структур и их разверток на плоскость;
- разработана теория формирования мотальных паковок слоисто-каркасной структуры и заданной формы намотки;
- предложены и обоснованы новые структурные параметры 3D намоток такие как: раппорт 3D намотки по углу сдвига, раппорт 3D намотки по ширине раскладки, раппорт 3D структуры намотки базовых нитей, раппорт 3D структуры намотки перевивочных нитей, коэффициент жесткости (переплетения) 3D намотки, коэффициент связности 3D намоток;
- разработаны конструкции мотального оборудования для формирования паковок различного назначения;
- разработана технология производства композиционных текстильных фильтров, на базе различных структур намотки паковок специального назначения.

**Практическая значимость** результатов работы заключается в:

- разработке новых способов создания конструкционных композиционных материалов, формируемых на базе 3D намоток мотальных паковок различной степени замыкания намотки, как цельных, так и отдельных элементов (преформ) композиционных материалов (патенты РФ № RU 2820117, RU 2808762);
- разработке и создании новых конструкций мотального оборудования, необходимого для формирования преформ композиционных материалов заданной формы и требуемых размеров, на базе 3D намоток мотальных паковок;
- разработке метода расчета кинематических параметров мотального механизма, необходимых для формирования требуемых структур 3D намоток;
- получении опытных образцов полимерных композиционных материалов, армируемых различными структурами 3D намоток различного назначения;

- внедрении в производство технологии армирования композиционных материалов, формируемых на базе мотальных паковок различных структур (в том числе 3D намоток) и их разверток на плоскость;
- предложены и доведены до промышленного внедрения новые конструкции фильтров (патенты РФ № RU 226225, RU 219377 U1).

**Используемые в работе методы исследования.** В теоретических исследованиях использованы методы дифференциального и интегрального исчислений. При расчете давления витков намотки на паковках заданной кривизны поверхности использовали выражение квадрата кривизны винтовой линии. При расчетах величин передаточного отношения от паковки к нитераскладчикам, использовался алгоритм Евклида для разложения иррациональных чисел в подходящие цепные дроби, разработан авторский программный продукт, позволяющий реализовать его на специальном мотальном оборудовании, оснащённом ПЭВМ.

**Автор защищает:**

- технологию формирования структур 3D - намоток мотальных паковок;
- способы армирования полимерных композиционных материалов на базе различных структур намотки мотальных паковок;
- теоретические положения по формированию композиционных материалов с максимальным коэффициентом заполнения их армирующим компонентом;
- способ создания плоских, объемных текстильных заготовок увеличенной толщины, используемых в качестве заготовок при производстве композиционных материалов, формируемых на базе разверток намотки на плоскость;
- теоретические положения по процессу формирования намоткой паковок произвольной кривизны поверхности и заданных размеров, используемых в качестве заготовок цельных композитов;
- конструкции мотальных механизмов, обеспечивающих формирование прецизионных намоток и паковок слоисто – каркасной структуры, требуемой формы, заданной кривизны поверхности и типоразмеров;

- метод расчета кинематических параметров мотального механизма, необходимых для формирования прецизионных (точных) армирующих структур намотки мотальных паковок специального назначения;

- рекомендации по оптимизации структур конструкционных материалов и технологии создания полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов, формируемых на базе текстильных технологий и мотальных паковок.

- разработку композиционных фильтров тонкой очистки и обеззараживания воздуха, без использования ультрафиолетового излучения.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендации,** сформированных в диссертации, подтверждается достаточным для практики соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, современными методами их решения, применением известных положений фундаментальных наук в области создания композиционных материалов с использованием текстильных технологий.

### **Публикации, апробация и реализация результатов работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в 32 публикациях в том числе 12 в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, из них 6 статей в журналах, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных Web of Science и Scopus.

Получено 8 патентов на изобретение и полезную модель.

### **Результаты работы представлены и получили положительную оценку на:**

- международной научно-технической конференции. «Прогресс-2013» Иваново, Ивановский политехнический университет 2013 г;

- международной научно-технической конференция «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности». Москва, МГУДТ, 2013 г;

- шестом международном экономическом форуме в рамках Технологической платформы легкой промышленности. Чебоксары, 2013 г;
- международной научно- технической конференции «Новое в технике и технологии текстильной и легкой промышленности» Республика Беларусь. Витебск, 2013 г;
- международном научно-практическом симпозиуме «Технический текстиль России: Нетканые материалы, сырье. Реинжиниринг». Москва МВЦ "Крокус Экспо" 2023 г;
- Китайско-Российском конкурсе инноваций, с демонстрацией разработанных композиционных фильтров для очистки и обеззараживания воздуха, 2023 г.
- всероссийском семинаре по теории механизмов и машин (Костромского филиала РАН РФ институт машиноведения им. А.А. Благоданова) секция «Текстильное машиноведение», Кострома, 31.10.2024.

Результаты работы внедрены в производство ряда предприятий атомной отрасли, и при создании систем экологической безопасности человека, а именно на предприятиях: АО «НИИГрафит» г. Москва; ООО «ООО НИЭК», Московская область, г. Люберцы.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности.** Диссертационное исследование (предмет исследования, содержание задач и результаты решения) соответствует паспорту специальности **2.6.16 Технология производства изделий текстильной и лёгкой промышленности:**

п.1 в части «инновационное развитие технологий переработки материалов текстильной промышленности»;

п.2 в части «проектирование структуры и прогнозирование свойств материалов»;

п. 10 в части «развитие теоретических основ проектирования и переработки материалов»;

п. 13 в части «разработка оптимальных структур материалов для снижения затрат на организацию их производства и повышение качества»;

п. 19 в части «разработка новых материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства изделий текстильной и легкой промышленности (ИТЛП)».

### **Объем и структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы, семи приложений. Работа изложена на 307 страницах машинописного текста, включая 62 рисунка, 4 таблицы и 7 приложений на 40 страницах.

## **Глава 1. Анализ процессов армирования полимерных композиционных материалов, с использованием текстильных технологий**

Композитные материалы, производимые с использованием текстильных технологий известны человеку с древних времен. Во времена египетского рабства евреи добавляли солому в глину при изготовлении кирпичей, придавая тем самым им большую прочность и устойчивость к разрушению (растрескиванию при температурном воздействии) на жарком солнце [1].

К первым композиционным материалами, следует отнести и керамические изделия, в состав которых включались добавки небольшого количества текстильных волокон, значительно увеличивающих прочность и вязкость хрупких глиняных изделий.

Современные композиционные материалы представляют собой многокомпонентные структуры, состоящие из пластичной основы (матрицы) и наполнителя (текстильного материала в виде волокон, нитей, тканей, трикотажа, нетканого материала). Наполнители являются армирующими материалами, придающими конечным изделиям заданные свойства, а именно: повышенную прочность, устойчивость к истиранию, ударным нагрузкам, воздействию повышенных температур, и т.д.

Целью создания композитов является получение новых конструкционных материалов с требуемыми качественными характеристиками за счет сочетания в одном изделии разнородных веществ, не обладающих в отдельности показателями, требуемых свойств готового продукта. Именно по этому, композиты превосходят известные моноструктурные материалы и даже сплавы металлов, по своим прочностным свойствам, при значительном снижении веса, что особенно важно для создания конструкций летательных аппаратов, скоростных машин и морских судов наводного и подводного флота [2].

Именно текстильные материалы (углеродные, синтетические полиакрилонитрильные волокна, ткани, арамидные, вискозные и высокомодульные полиэтиленовые, а также кремнезёмные волокна, стекло и асбестовые волокна) позволяли в начале 60-х годов прошлого столетия создавать композиты с высокой термостойкостью, хорошими теплоизоляционными свойствами, высокой удельной прочностью, сопротивлением усталости и жесткостью.

Использование анизотропии свойств текстильных материалов при армирование ими пластичных матриц, предопределило создание новых конструкционных материалов, заложенных в основу космической техники, авиастроения, судостроения, автомобилестроения и даже современного спортивного инвентаря [2,3].

Одним из главных критериев, определяющих качество и свойства композитов формируемых с использованием текстильных материалов, является процентное соотношение (доля вложения) текстильного армирующего компонента и связующих (эпоксидных и полиэфирных смол) в общем объеме композита. Это соотношение считается оптимальным, когда доля армирующего материала будет небольшой, (для получения композита минимального веса), при высоких прочностных характеристиках материала и низкой его себестоимости изготовления. Однако, как показывает практика применения композиционных материалов в критических отраслях, максимальные прочностные характеристики показывают композиционные изделия, армирующие структуры которых выполнены с более высоким коэффициентом заполнения.

Кроме того, экономический аспект заставляет ученых разрабатывать «короткие» технологии производства композитов, так как существующие процессы их выпуска характеризуются многостадийностью, высокими энергозатратами и т.д., что делает, решаемую в диссертации задачу актуальной, а внедрение её результатов в реальное производство перспективным.

### **1.1. Виды текстильных материалов и технологий, применяемых при изготовлении композитов в качестве наполнителей**

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует единая классификация композиционных материалов, в которых применяются текстильные структуры. Это обусловлено, по нашему мнению, большим многообразием создаваемых композитов и разнообразными областями их применения, а также большой гаммой различных видов структур текстильных материалов, используемых для их формирования в качестве наполнителей (армирующих компонентов композиционных материалов).

Основная группа композитов с текстильными наполнителями, создается для получения легких, жестких и прочных материалов, способных работать длительное время в экстремальных условиях (при больших перепадах температур и высокими внешними нагрузками). Здесь используются, в основном, углеродные волокна, нити, ткани, вырабатываемые на специальном оборудовании.

Вторая группа композитов, нацелена на создание конструкционных материалов со специфическими свойствами, это негорючие холсты нетканого материала, или негорючие ткани, экранизирующие радиолокационные и тепловые оболочки, материалы медицинского назначения (стерилизаторы, ткани ароматические, металлизированные ткани), даже обувь и одежда специального назначения (для космонавтов, спортсменов и т.д.). Здесь в качестве второго компонента наполнителя могут использоваться кремнезёмные, арамидные и стекловолокна, а также специальные пропиточные химические вещества, позволяющие регулировать свойство композита, а именно:

- гидрофильность;
- гидрофобность;
- масло отталкивающую способность;
- способность восстанавливать свои размеры после сжатия;

- способность пропускать воду (фильтры);
- эмиссию химических веществ;
- стойкость к действиям щелочей;
- стойкость к многократным стиркам;
- стойкость к истиранию;
- стойкость к изменениям температуры и т.д.

Наряду с обозначенными свойствами и технологическими требованиями, создаются материалы обеспечивающие:

- экологическую безопасность человека;
- не токсичность и т. д. [3,4,5], они образуют отдельную группу, которую составляют металлические композитные материалы [5], формируемые на основе сплавов Al, Mg, Cu, Ni, Cr. Они армируются углеродными, борными или карбидкремниевыми волокнами, а также стальной молибденовой проволокой [6], а так же керамические композиты, которые армируются углеродными, карбидкремниевыми жаростойкими волокнами.

Композитные материалы, с долевым содержанием арамидных, борных, стеклянных волокон, в объёме материала 50 – 70%, обладают очень высокой ударной прочностью и ударным модулем упругости. Их прочность превышает более чем в пять раз, прочность обычных композитов [6,7]. Кроме того, все композиционные структуры с наполнителем из текстильных волокон, превосходят металлы и сплавы по усталостной прочности, виброустойчивости, термоустойчивости, ударной вязкости и многим другим свойствам, что значительно расширяет область их применения. Однако все композиты, формируемые с использованием текстильных волокон, отличаются хаотичным их расположением в структуре матрицы, что порой приводит к нарушению целостности и прочности элемента композита на этих участках [8].

Композиционные материалы с углеродной матрицей, так называемые «углерод-углеродные композиты» - УУКМ, обеспечивают большое многообразие многомерных структур укладки стержней, изотропия которых увеличивается с

ростом числа направлений армирования (структур 3D, 4D), имеют высокопрочную термостойкую моно-структуру, что позволяет использовать их в различных отраслях промышленности. Однако существуют и технологические проблемы производства крупногабаритных изделий УУКМ, выражающиеся в неоднородности физического состояния их структур. Это, по нашему мнению, обусловлено неоднородностью (слабосвязанностью) структуры углеродных армирующих компонентов крупногабаритных заготовок, приводящей к неравномерному заполнению объёма углеродной матрицей и, как следствие, разнородному теплофизическому состоянию в различных участках изделия. Следует отметить, что формирование углеродных стержней из углеродных нитей, осуществляется по текстильным технологиям, что делает актуальным развитие исследований в данном направлении.

## **1.2. Армирование композитов с использованием текстильных волокон**

Волокнистые наполнители применяются в виде нитей, жгутов, ровингов, при создании конструкционных, высокопрочных и высокомодульных полимерных композиционных материалов. Наиболее широкое применение получили стеклянные, углеродные, базальтовые, борные и полимерные волокна диаметром 5 - 100 мкм, (круглого и профильного сечений). Применение монокристаллических волокон (нитевидных кристаллов), получаемые из окислов, карбидов, нитридов, ограничено, несмотря на очень высокий модуль упругости, что обуславливает их прочность при растяжении.

Волокнистые полимерные композиционные материалы подразделяют по волокнистому составу наполнителя (натуральные или химические органические и

неорганические волокна), а также по назначению (пресс-волокниты, текстолиты, гетинаксы) [9,10]. Особенности армирования и области применения волокнистых полимерных композиционных материалов изложены в работах [11,12]. Выбор волокон для их применения в композитах обусловлен, прежде всего, характерными, только для них свойствами:

Полиэфирные волокна обладают:

- а) устойчивостью к действию агрессивных сред (кислот, водно-соленых растворов и органических растворителей);
- б) низким влагопоглощением.

К недостаткам данных волокон следует отнести ограниченную устойчивость к воздействию щелочей.

Полиакрилонитрильные волокна отличаются:

- а) устойчивостью к воздействию химических веществ
- б) более высокой, по сравнению с полиэфирными волокнами, устойчивостью к воздействию щелочей;
- в) высокой устойчивостью к воздействию ультрафиолетового излучения (отсутствует эффект пожелтения);
- г) пригодностью для изготовления «прозрачных изделий» (по величине коэффициента преломления световых лучей близки к ненасыщенным полиэфирным смолам) [13].

Стеклянные волокна, их несколько видов:

Стекловолокно - Е обладает:

- а) пригодностью для изготовления многофункциональных элементов композитов (при высоких требованиях кислотоустойчивости);
- б) идеальной прочностью для производства стеклянных изделий;
- в) высокой устойчивостью к воздействию щелочей.

Стекловолокно - С обладает:

а) повышенной устойчивостью к воздействию кислот; однако оно менее прозрачно, чем стекловолокно Е и менее устойчиво к воздействию щелочей.

Углеродные волокна характеризуется:

а) высоким содержанием углерода (99,5% по массе), выпускаются на основе гидратцеллюлозы, сополимеров акрилонитрила, а, следовательно, обладает высокой прочностью;

б) высокой площадью внутренней поверхности (до 400 м/г); что определяет их хорошие фильтрационные свойства;

Углеродные волокна делят по способу производства на три группы; частично карбонизированные, угольные (карбонизированные) и графитированные, максимальная температура обработки которых соответственно: ниже 500, 500 – 1500 и выше 1500, а содержание углерода соответственно: менее 90%, 91 – 99% и выше 99% по массе.

Базальтовые волокна – производятся из магматических пород (базальтов) путем расплава, причем для производства штапельных волокон раздувом воздуха из расплава, имеющего вязкость менее 90 П (пуаз), при температуре 1400<sup>0</sup>С, а непрерывные волокна формируются из расплава на фильерах. По своим характеристикам базальтовое волокно занимает промежуточное положение между стекловолокном и углеродными волокнами, но значительно дешевле [14].

Армированные волокнами композиты обладают рядом преимуществ, среди которых хорошие диэлектрические свойства. Однако, имеются и недостатки, главными из которых является: меньший, по сравнению с другими видами наполнителей, объёмный коэффициент заполнения композита, что обусловлено, по нашему мнению, более высокой их неровнотой и хаотичным распределением, а, следовательно, каждое отдельное волокно, окружено большим объёмом матрицы (связующего).

Кроме того, структура распределения волокон важна, как средство достижения заданного расположения и ориентации волокон по отношению к направлению действующих усилий в композите или готовом композитном

изделии, однако она в большей степени имеет хаотичный характер, что и обуславливает большой объём матрицы, и, как следствие, значительный вес конечных изделий.

### **1.3. Нетканые полотна, применяемые при армировании полимерных композиционных материалов**

Быстрые темпы роста объемов производства нетканых материалов, их дешевизна и использование в различных областях хозяйствования, обуславливает возможность применения их как элементов армирования композитов.

По существу, все нетканые материалы, формируемые клеевым способом, уже, по сути, являются композитами, однако в них доля наполнителя (текстильных волокон) значительно превалирует над связующим элементом (латексами). Данное соотношение может колебаться: от 85% до 98% волокон, соответственно от 15% до 2% клеевого состава.

Малое содержание связующих элементов в общем объеме нетканых материалов делает их гибкими, воздухопроницаемыми, но главное легкими. Масса 1 м нетканых волокнистых материалов (с клеевым связующим) достигает до 25 грамм, что позволяет существенно экономить дорогостоящее волокно. Возможности практического применения нетканых полотен, для армирования композиционных материалов, подробно описаны в работе [15]. В данной работе отмечается, что нетканые полотна, в отдельности, или совместно с другими компонентами, все шире применяются для замены металлов, железобетона и других видов традиционных, строительных материалов. Например, кровельных,

изоляционных, обеспечивая при этом увеличение срока службы изделий, резкое уменьшение их массы ряд других важных преимуществ перед моно – материалами. Для создания композиционных материалов первой группы – с высокими прочностными характеристиками, в нетканых материалах используются волокна с высокими прочностными характеристиками, например, полиакрилонитрильные, полиэфирные и стеклянные волокна [16]. Выбор волокнистого состава сырья, а также способы и объемы нанесения связующих элементов, при изготовлении композиционного нетканого материала, определяется его назначением и необходимыми качественными показателями конечного продукта [17]. Одной из последних научных работ, направленных на совершенствование процессов проектирования структур и применения нетканых полотен в народном хозяйстве, является монография Трещалин Ю.М. [18]. В данной работе автором получены аналитические зависимости физико-механических характеристик композиционных материалов от объемной плотности и пористости нетканых полотен, а также определены критерии и уравнения, учитывающие показатели волокнистого состава нетканой основы и характеристики связующего, что дает возможность прогнозировать характеристики композиционного материала. Однако, в данной работе нет четкого определения структурных показателей нетканых полотен, повышению коэффициента заполнения армирующим компонентом объема композиционного материала.

Для повышения этого показателя применяется ряд способов формирования композиционных нетканых материалов:

- способ ручной выкладки нетканого материала с последующим нанесением связующего элемента и напылением волокон требуемого состава. Однако следует отметить, что данный способ трудоемок и используется главным образом при создании крупногабаритных изделий с односторонней гладкой поверхностью. При многослойной (многокомпонентной) укладке холстов воздух между слоями удаляют на механических прижимных валах, что обеспечивает плотное соединение этих слоев;

- способ прессования готовых нетканых холстов из стекловолокон с нанесением между ними связующего. Формование композита происходит под давлением сформированного пакета (сэндвича) на прессах (в заготовленных пресс-формах) [19];

- непрерывный способ, когда на пленочную основу наносится слой связующего, на котором последовательно укладываются слои нетканого холста, слой стеклоткани и наносится второй слой связующего с пленкой. При необходимости композиционный материал, формируется и кроится по требуемым типоразмерам;

- намоткой на оправку, при данном способе смола наносится на оправку, покрытую антиадгезионной пленкой или парафином. Затем на нее наматывают сухой нетканый холст (пропитанный дополнительным связующим). Воздух из нетканого холста удаляется в процессе намотки укатывающим роликом.

Преимущество данного способа создания композиционных материалов, перед ранее описанными, заключается в том, что при намотке формируется конечный продукт – композит (труба, цилиндр, конус и т.д.), а сочетание многослойной намотки нетканых холстов из разного сырья (стекла, полипропилена, углеродных волокон) позволяет значительно расширить спектр областей применения получаемых изделий.

Основной областью использования композитов, формируемых на базе нетканых материалов, является нефтедобыча, а точнее производство нефтесорбирующих материалов [20]. Это сорбционные боны и подушки (для использования на воде) при локализации и адсорбции нефтепродуктов и нефтяных пятен.

Стекловолокнистые материалы в сочетании с другими видами материалов широко используются в строительстве (в качестве кровельных покрытий, черепицы, в качестве материалов для отделки автомобилей) [15], где к материалам предъявляются высокие требования в отношении:

- стабильности размеров;

- акустических свойств, например, в производстве потолочных плит, плавающих полов;
- антикоррозионных свойств (при изготовлении стеклопластиков, изоляции трубопроводов, «футировке» поверхностей химических аппаратов, нефтедобывающей отрасли и т.д.);
- огнестойкости (при дублировании со всеми материалами и стекловатой).

По нашему мнению, механические характеристики готовых композиционных материалов, армированных неткаными полотнами, находятся в прямой зависимости от ориентации волокон и способа скрепления холста. Регулируя долю связующего состава в объеме композита можно формировать более эластичные или более жесткие материалы. Однако, хаотичное расположение волокон в структуре армирующего компонента композита, является одной из главных причин, приводящих к их разрушению и «пробою» материала при динамических или гидродинамических точечных нагрузках на материал [21].

В этом заключается и главный недостаток композитов, армируемых на базе нетканых материалов, что ограничивает их область применения в особо экстремальных условиях эксплуатации (например, при нагрузках переменного направления, ударном воздействии на материал, перепадах давления в трубопроводах и т.д.).

#### **1.4. Нити и нитевидные материалы, как композиты и наполнители композиционных материалов**

Нити и нитевидные материалы (жгуты, ровинги, шнуры и т.д.), как композиты и наполнители композиционных материалов нашли широкое применение в различных областях хозяйствования. Они широко используются в качестве армирующего материала всех пластиковых шлангов, оплетки и экранирования кабелей, трансформаторных обмоток, в канатах и тросах и т.д. Структура (текстильная структура или строение) синтетических (капроновых, полипропиленовых, лавсановых) и искусственных (вискозных, ацетатных, углеродных, арамидных, триацетатных) комплексных нитей во многом определяет их свойства, технико-экономические показатели производства и применения, а, следовательно и качество готовых композиционных материалов в которых они применяются [22,23].

Изучение механических свойств синтетических и искусственных нитей, используемых для армирования композиционных материалов, началось в тридцатые годы прошлого столетия. Именно тогда же появились первые научные работы по модификации углеродных волокон [24,25]. Данные исследования показали, что механические свойства искусственных комплексных нитей, в значительной степени, зависят от их структуры, которую, в свою очередь, определяют форма и размеры поперечника, количество филамент в нити и взаимное их расположение.

В работах [26,27] показано, что свойства комплексных нитей, в том числе и механические, существенно зависят от формы поперечного сечения элементарных нитей и линейной плотности. Эти же свойства определяют и качественные показатели композиционных материалов, в которых они применяются.

Однако все синтетические и искусственные нити в настоящее время применяются в композитных материалах только как армирующий элемент, в то время как сами комплексные нити могут представлять собой конструкционный материал для производства композитов. Примером могут служить бикомпонентные нити, описанные в работе [28,29]. Данные нити были сконструированы и изготовлены для получения искусственной извитости, аналогичной извитости шерсти. Для этого необходимо соблюдение двух условий: а) после того как химическая нить сформирована и проведен процесс вытягивания, релаксация внутренних напряжений должна проявиться в усадке нити; б) внутренние напряжения, возникающие при вытягивании должны распределяться неравномерно.

Первое условие является необходимым, но недостаточным, а второе, связанное с разнородностью структуры нити, обуславливает при усадке появление извитости. Такие условия сочетания полимеров могут быть созданы при выпуске нити из фильер во время вытягивания и формования двух (или более) полимерных компонентов. Скоростные режимы подачи сополимеров в зону формования и вытягивания бикомпонентной нити обеспечат то, или иное соотношение между величиной внутренних напряжений и интенсивностью межмолекулярного взаимодействия. Создание бикомпонентных нитей открывает новые пути разработки композиционных материалов, такие как, два или более компонента нити при определенных условиях (например, охлаждении в космическом пространстве) начинают усаживаться по-разному. Это свойство волокон приведет к тому, что при завершении процесса усадки у одного компонента его сечение изменится и стабилизируется, а сечение второго будут продолжать изменяться, при этом появятся изгибающие моменты, направленные в сторону сокращающегося компонента [30]. Данное свойство волокон может быть использовано при создании спецодежды, применяемой в условиях большого перепада температур, но так же,, по нашему мнению, требует дальнейшего, более глубокого изучения. Бикомпонентные нити проявляют новые свойства при приложении к ним

растягивающих усилий, за счет межмолекулярного взаимодействия компонентов. Например, у поликапроамидных нитей снятие и приложение внешних нагрузок (напряжений) при нормальной температуре, не сопровождается значительной усадкой и появлением извитости. Дело в том, что повышение степени вытягивания поликапроамидные нити, макромолекулы которого имеют регулярное строение и содержат группы, способные к образованию водородных связей, приводит к образованию внутренних напряжений и к значительному увеличению интенсивности межмолекулярного взаимодействия. Это фиксирует напряженное состояние вытянутой нити и при снятии внешнего усилия (при обычной температуре), внутренние напряжения не приводят к ее усадке.

Усадка возникает только при обработках, уменьшающих межмолекулярное взаимодействие и ослабления водородных связей (за счет набухающих агентов). В работах [31,32] отмечено, что регулярное строение гибких линейных макромолекул термопластичных кристаллизующихся полимеров, для которых межмолекулярное взаимодействие может быть организовано только за счет сил Ван-дер-Ваальса, обуславливает возможность реализации высоких степеней вытягивания и оптимальных соотношений между внутренними и межмолекулярными взаимодействиями.

Технологический процесс получения бикомпонентных нитей и мононитей включает в себя следующие операции: формование, вытягивание, сортировку нити, упаковку, маркировку, транспортировка и хранение. Все данные операции имеют важное значение, так – как они могут повлиять на свойства конечного продукта.

Формование бикомпонентной нити осуществляется на двух плавильных установках, в которых расплавляются независимо друг от друга два разных полимера, либо два однородных полимера с различными свойствами.

Расплавленная полимерная смола под напором шнека и избыточного давления азота подается к дозирующим насосам, от которых по отдельным каналам нити направляются к фильерам. Сформированная нить обдувается потоком чистого воздуха и окончательно охлаждается в термокамере. Далее нить наматывается с

постоянной скоростью на паковку [33]. Следует отметить, что технология формирования бикомпонентных нитей совершенствуется эффективно особенно за рубежом (в Германии). В России таких исследований проводится недостаточно. Развитие данного направления открывает новые возможности в армировании и создании композитов на базе текстиля [34,35].

Одним из древних способов создания нитей со свойствами композиционного материала является их металлизация. Совместное применение металлов и текстиля связано с изготовлением доспехов (кольчуг, лат, баданов) [36]. а также золотых нитей, для украшения одежды – «аксамит», изготавливаемой из шелка, золотых и серебряных нитей [37]. Способ сочетания металлов с текстильными нитями, основанный на пропитке их расплавленными металлами, разработан недостаточно, ввиду сложности технологического процесса их объединения, поэтому часто используются тонкие (пощенные) металлические нити покрытые полимерными пленками (нити - люрекс) [38].

Способы введения металла в текстильные изделия, основанный на осаждении металлического слоя на текстильных нитях, применялся ранее только при изготовлении войлоков и нитей «Фортекс - Майлер», «Ламе - Майлар», (которые применялись для декоративной отделки занавесов, драпировочных тканей и т. д.).

Получение металлических волокон, описано в работе [39]. Эти волокна представляют собой монокристаллы длиной до 20 мм, отличающиеся высокой прочностью на растяжение (от 100 до 1000 раз выше прочности поликристаллического металла того же состава). Данные нити не нашли широкого применения ввиду высокой их стоимости, веса и сложности технологического процесса, но они стали прообразом создания углеродных нитей, разрывная нагрузка которых достигает 5,5 ГПа, а модуль упругости 290 ГПа. Обладая упорядоченной структурой, кристаллы углерода, нити диаметром от 5 до 15 мкм отличаются низким удельным весом, низким коэффициентом температурного расширения, химической стойкостью, что делает их широко применяемыми при создании композиционных материалов.

**Углеродные нити** были получены и запатентованы американским ученым Томасом Эдисоном в 1880 году и применены в качестве нитей накаливания в электрических лампах. Данные нити создавались в результате пиролиза хлопкового или вискозного волокна.

В настоящее время углеродные нити получают термической обработкой химических или природных органических волокон, при которой в материале волокна остаются главным образом атомы углерода. Термообработка проводится в несколько этапов:

- окисление исходного волокна на воздухе при температуре 250°C в течении 24 часов;
- карбонизация (нагрев в среде азота или аргона) при температурах от 800 до 1500°C, в результате чего происходит образование графитоподобных структур;
- графитизация (также в инертной среде) при температурах 1600 – 3000°C, содержание углерода доводится до 99%;

Основные способы получения композитов, армированных углеродными нитями, являются: выкладка, литье под давлением, пултрузия и т.д.

Благодаря низкой объемной плотности, по сравнению с металлами, от 1,7 до 1,9 г/см<sup>3</sup> углеродные нити используются для выработки легких тканей применяемых в качестве термостойких покрытий, наполнителей, первичных и вторичных структур самолетов, ракет и т.д. Область применения углеродных нитей настолько широка, что потребность в них неуклонно возрастает, однако сдерживающими факторами до настоящего времени являются: дороговизна, технологии изготовления изделий, сложность и многостадийность и высокие требования экологическая безопасности технологии выработки углеродных тканей, низкая устойчивость нитей к истирающим воздействиям, что обуславливает высокую себестоимость углеродных композитных материалов.

**Арамидные нити** формируются методом поликонденсации в растворе синтетического полиамида при низкой температуре (5 – 10°C). Полимер получают добавлением в раствор реагентов при интенсивном перемешивании. Из раствора

полимера методом экструзии через фильеры формируется волокно и нити (при температуре формования 50 – 100°C). Арамидные нити получили название «кевлар», число элементарных монопилей в которых может изменяться от 130 до 1000 (для изготовления тканей) и от 500 до 10000 при изготовлении канатов. Диаметр элементарных арамидных нитей составляет около 11 мкм.

Способы использования арамидных нитей в композиционных материалах определяются их свойствами. Нити «Кевлар», СВМ, «Армос», «Русар», «Таврон» имеют высокую ориентацию волокон, что обуславливает:

- высокую прочность при растяжении (до 260 сН/текс);
- высокий модуль упругости;
- низкое относительное удлинение при разрыве;
- устойчивы к воздействию химических реагентов;
- не подвержены коррозии и биостойки;
- термостойки;
- не пропускают электрический ток.

Данные положительные свойства арамидных нитей делают их подходящими для производства защитной одежды (бронезилетов), в производстве кабелей высокого напряжения, жгутов для армирования композитов, высокопрочных нитей, шнуров, канатов и т.д.

Основная сложность переработки арамидных нитей в композитные материалы связана с технологией их перематывания и истирания направляющими органами машин, что приводит к потере их прочности. Гладкая поверхность нитей и несовершенная структура намотки паковок (бобин, сновальных катушек, навоев), приводит к образованию слетов нити с поверхности паковки и ее обрывам, что снижает качество готовых изделий. Интенсивное истирание нитей движущимися органами текстильных машин приводит к выделению мелкодисперсных волокон вредных для здоровья человека, поэтому их переработка требует специальных средств защиты (респираторов, очков и т.д.). Эти же недостатки присущи и технологии переработки углеродных нитей. Поэтому учеными текстильщиками в

России и за рубежом проводятся интенсивные работы по сокращению технологических цепочек переработки данных нитей, применяемых при армировании композиционных материалов, т.е. по «созданию коротких технологий», так же позволяющих снизить энергозатраты и себестоимость конечного продукта.

### **1.5. Трикотаж, как наполнитель композиционных материалов**

**Трикотажные (вязаные) полотна**, в настоящее время сравнительно мало используются при производстве композиционных материалов [40], это обусловлено тем, что они формируемые петельной структурой нитей, обладающей высокой податливостью, что, как считают некоторые исследователи, не позволяет получать композиционные прочные и жесткие изделия. Однако в последние десятилетие в нашей стране появились научные исследования, проводимые в области армирования композиционных материалов основовязаным трикотажем [41]. Данные структуры представляют собой несколько систем параллельных нитей, пересекающихся друг с другом под определенным углом и скрепленных каким-либо основовязаным переплетением. К таким научным разработкам следует отнести научные исследования, проведенные под руководством профессора Труевцева А.В. на кафедре «Технологии и художественного проектирования трикотажа» СПбГУПТД. В работе [40] доказано, что композит, армированный кулирным трикотажем, является анизотропным материалом. Однако, будучи помещенным в полимерную матрицу, трикотаж кардинальным образом меняет свои свойства – точки контакта между петлями уже не могут свободно смещаться, и удлинение возможно лишь за счет деформирования нитей, растяжимость

которых в 10–100 раз ниже, чем у вязаной структуры в свободном состоянии. Эти свойства кулирного трикотажа позволяют создавать новые конструкционные композиционные материалы с малыми радиусами кривизны [41]. Данные композиты применимы в случаях изготовления изделий с расположением наполнителя в виде вязаных объемных форм, причем с различной плотностью вязания на отдельных участках изделия с достаточно большой толщиной армирующего материала [42, 43].

В данной работе отмечено, что: «Уникальные свойства трикотажных полотен, и, прежде всего, способность принимать сложные пространственные формы, путем вязания изделия по заданному контуру, определяют актуальность использования кулирного трикотажа в качестве армирующего элемента композиционного материала». Кроме того, следует отметить и то, что обтягивание трикотажем различных поверхностей с последующим заливанием его пластмассой (связующим) открывает широкие возможности применения данного способа армирования.

Однако, в специалисты технического текстиля Германии, получили 3D структуры, формируемые на двухфонтурных рашель-машинах. Они применяются не только при производстве композитов и в строительстве, но и при получении специальной функциональной одежды, материалов для обуви, мебели, сидений для автомобилей и самолетов, фильтровальных и теплозащитных материалов, медицинских изделий.

Для производства 3D текстиля фирма Карл Майер выпустила специальную основовязальную машину для производства полотен с толщиной до 35 мм и скоростью вязания, в зависимости от толщины трикотажа и перерабатываемого материала, от 150 до 400 мин<sup>-1</sup>. [44]

В других зарубежных исследованиях, по данному вопросу отмечается, что трехмерные плетеные и вязаные структуры могут широко применяться при изготовлении изделий, сложной формы. Эти виды наполнителей изготавливаются обычно на основе высокопрочных или высокомодульных нитей, например,

параарамидных. Получаемые объемные структуры имеют внешнюю форму изготавливаемых изделий. В этих структурах нити располагаются таким образом, чтобы они были ориентированы в направлении наибольших механических напряжений.

Детали и изделия получают обычно путем пропитки объемных структур компонентами реактопластов с последующим отверждением матрицы.

Однако трикотажные армирующие структуры имеют и свои, специфичные недостатки, это растяжимость петель и низкое значение объемного заполнения композита. Кроме того, известно, что в современных текстильно-армированных композитах обычно применяются армирующие текстильные материалы из высокопрочных нитей, переработка подобных нитей на вязальном оборудовании недостаточно отработана и может вызывать трудности.

### **1.6. Ткани в структуре композиционных материалов**

Первые научные работы в России, по созданию композиционных материалов на базе многослойных тканых структур из углеродных нитей, были проведены под руководством профессора Гордеева В.А. в Ленинградском текстильном институте имени С.М. Кирова, в 70-80 е годы двадцатого века. Исследователями были сформированы многослойные образцы тканых структур в виде тавра, конуса, ферм и т.д. Все они формировались на челночных ткацких станках, но ввод уточных нитей в зев осуществлялся рапирами [45,46] Однако ввиду отсутствия отечественного технологического оборудования, которое было необходимо для реализации сделанных наборок, внедрение данных исследований в реальное производство не состоялось.

Исследования в развитие теории формирования новых тканых структур, применяемых для армирования композиционных материалов, проводились в Ивановском текстильном институте, среди которых следует отметить работы Т.Ю. Каревой [47,48] и А.И. Сеницына [49]. Особое внимание в настоящее время исследователями уделяется разработке методологии проектирования геометрических структур и прогнозированию свойств текстильных материалов объемного строения, и методике 3D моделирования трехмерных ортогональных тканей [50,51].

В настоящее время зарубежные исследования в области проектирования и изготовления тканых объемно-армирующих преформ и материалов на их основе ведутся крупными фирмами – в первую очередь американскими: BPM (США), Albany Engineered Composites (США), 3TEX (США). В Германии для этих целей выпускаются узкие ленточные ткацкие станки «Mageba» и «Jurgens», с шириной заправки от 300 до 1200 мм.

В нашей стране подобное оборудование только разрабатывается, а изготовление полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием объемно-армирующих цельнотканых преформ освоено широко. Базовыми ткаными структурами являются однослойные ткани, вырабатываемые из углеродных нитей на зарубежных бесчелночных (рапирных) ткацких станках типа GTV8/SD фирмы DORNIER, Германия, а исследования направлены на повышенное сопротивление расслаиванию материала в готовых изделиях при приложении к ним больших нагрузок [52].

Главным армирующим наполнителем высокопрочных композиционных материалов, создаваемых в настоящее время для решения высокотехнологичных задач, являются тканые структуры, вырабатываемые на зарубежных бесчелночных (рапирных) ткацких станках. Углеродные, арамидные (кевларовые), кремнеземные, стеклоткани, металлизированные ткани специального назначения из смесовых нитей, в совокупности со связующими, составляют основную массу композиционных материалов выпускаемых как в России, так и за рубежом [53; 54].

Наиболее полно и подробно процессы армирования композиционных материалов текстильными наполнителями различного вида изложены в работе профессора Перепелкина К.Е. [8].

Благодаря свойствам нитей и волокон, из которых они изготовлены, производится выпуск композиционных материалов в виде цельного изделия, или отдельных элементов (наполнителей полостей летательных аппаратов, заданной формы и размеров), для чего производят раскрой ткани по требуемым формам и лекалам. Применение пакетов тканей и связующих смол позволяет выпускать многослойные композиционные материалы (за счет наложения тканого полотна друг на друга).

В настоящее время учеными Костромского университета, под руководством профессора Рудовского П.Н. и Гречухина А.П. [55] проводятся работы по проектированию и созданию объемных многослойных тканей неортогонального строения из углеродных и арамидных нитей (большой толщиной). Работы профессора Рудовского П.Н. и Гречухина А.П., развили теорию проектирования производства многослойных 3D тканей, используемых для армирования деталей из композиционных материалов. Однако, как отмечено в работах [56,57] основные сложности, возникающие при выработке тканей, даже простых (главных) переплетений, связаны с низкой стойкостью комплексных искусственных (углеродных, арамидных) нитей к многоцикловым истирающим воздействиям на них рабочими органами ткацких станков. Истирание волокон приводит к образованию «начесов» (шишек из спутанных микроволокон), которые являются причиной обрывов отдельных волокон и, следовательно, приводит к снижению качества вырабатываемых тканей, увеличению отходов дорогостоящего сырья, повышению трудозатрат и, как следствие, себестоимости выпускаемых изделий.

Особое внимание при производстве композиционных материалов на базе тканей уделяется структуре переплетения нитей основы и утка, так – как она влияет на:

- объемы связующего, поглощаемого в порах структуры ткани - пространстве между нитями основы и утка, а также в межволоконном пространстве нитей, т.е. на величину коэффициента заполнения объема композита армирующим компонентом; плотность и жесткость армирующего материала;
- величину уработки нитей основы и утка в ткани, что вызывает дополнительные нагрузки (напряжение изгиба и деформации волокон) на нить, что влияет на прочностные свойства и объемную плотность армирующего материала в композитах.

С целью снижения массы и толщины ткани комплексные нити основы могут подвергаться «площению», в результате которого монопнити располагаются параллельно друг другу в виде плоской ленточки. Процесс «площения» комплексных нитей в настоящее время изучен слабо, и требует дополнительных исследований. Так как массовый выпуск углеродных нитей 1К; 3К; 6К; 12К; 24К и 48К превалирует в структуре композиционных материалов, а «К» - означает число тысяч элементарных нитей в структуре комплексной, то и процессы их переработки существенно отличаются друг от друга. Более плоские («площенные») нити обеспечивают высокую застилистость структуры ткани волокнистым материалом, но под действием растягивающих усилий нити изменяют форму и размеры поперечника, а, следовательно, это отражается на структуре ткани.

С целью сохранения целостности структур армирующих тканей из них изготавливают препреги – полуфабрикаты композиционных материалов. Их получают путем пропитки армирующей волокнистой основы полимерными связующими. Препреги широко применяются в качестве конструкционного материала при изготовлении облегченных прочных корпусов летательных аппаратов (самолетов, ракет, обтекателей, винтов), однако они требуют дорогостоящей технологии изготовления и специальных условий хранения (хранятся препреги в холодильнике при температуре – 15<sup>0</sup>С). Кроме того, тканые препреги представляют собой раскроенную по требуемой форме и размерам ткань, пропитанную связующими смолами, т.е. они не имеют целостной структуры.

Основными задачами, стоящими перед исследователями, работающими в области применения тканых структур для объёмного армирования композиционных материалов, остаются:

- создание ткацкого оборудования, позволяющего реализовать теоретические разработки в производство;
- формирование тканей с натуральной кромкой, что возможно только на челночных ткацких станках, (без обрезания уточин у кромок формируемой ткани);
- изыскание способов прокладывания утка из углеродных нитей в паковках, форма и габариты которых позволяли бы использовать челночное ткачество;
- формирование преформ больших габаритных размеров (для чего требуются многочелночные ткацкие станки с большой шириной заправки);
- формирование тканых преформ большой толщины (с возможностью изменения её в продольном направлении);
- все это требует создания высокотехнологичного оборудования ткацкого и приготовительного производства специального назначения.

Все эти задачи реализуемы, но только при условии продолжения глубоких научных исследований в области создания и производства специального ткацкого оборудования, что требует очень значительных материальных затрат.

### **1.7. Армирование композиционных материалов намоткой нитей, или нитевидными материалами**

Формирование композиционных материалов намоткой нитей на оправки заданной формы заключается в армировании волокнистыми наполнителями структур намотки мотальных паковок, с дальнейшей пропиткой их термореактивными или термопластичными смолами.

Наиболее полно и подробно производство композиционных материалов армируемых намоточными структурами описано в работе [58]. В данной работе приведены основные способы армирования композиционных материалов различного назначения с использованием намоток жгутов на оправки. Приведена классификация ПКМ по различным признакам, в том числе: по структуре армирующего компонента, степени ориентации наполнителя (анизотропии) и по объёмному содержанию наполнителя в общем объёме конечного продукта.

В качестве намоточных армирующих наполнителей часто применяются и углеродные тканые ленты. Однако в данном случае необходимо строго ориентировать слои намотки ткани, во избежание образования «фалд», или складок, которые снижают качество готового композиционного намоточного изделия.

В работе [59] отмечается, что формирование намоткой стеклонитей в виде лент на оправки трубы и емкости имеют ряд преимуществ перед аналогами, изготовленными из металлов, а именно:

- высокая прочность при малом собственном весе, что значительно снижает затраты на транспортировку и обслуживание;
- высокая термостойкость, способность сохранять прочность при температурах от -40 до +50 градусов C<sup>0</sup>;
- неподверженность коррозии и гниению;

- длительный срок эксплуатации (до 50 лет).

Самым важным, по нашему мнению, преимуществом армированных намотками композитов является простота и относительная дешевизна их изготовления [60]. Однопроцессный способ формирования армирующих структур и готового композиционного изделия, обуславливает:

- минимальное истирающее воздействие на нити в процессе их намотки на оправку, т.к. отсутствуют перемещающиеся направляющие нить механизмы (как на ткацком станке ремизки и бердо), следовательно, нить в меньшей степени подвержена трению и разрушению;

- целостность нити в структуре намотки (нить не обрезается как уток на ткацком станке), обеспечивает максимальные прочностные характеристики применяемых нитей и, как следствие, увеличение сроков службы готовых изделий, при снижении объема отходов;

- однопроцессный способ создания композиционных материалов намоткой снижает энерго и трудозатраты, а, следовательно, и себестоимость готовой продукции.

Несмотря на кажущуюся простоту процесса намотки нитей на паковку (оправку), он имеет много технологических особенностей. Для получения сложных армирующих структур намотки с требуемыми расчетными параметрами (например, заданной пористостью и проницаемостью) требуется знание факторов и закономерностей, которые определяют изменения технологического процесса намотки мотальных паковок, не только при формировании одной пары слоев, а в течение всего процесса её формирования.

Для этого так же требуется специальное мотальное оборудование, конструкция которого позволяла бы задавать параметры, определяющие структуру намотки формируемой мотальной паковки. К таким параметрам относятся:

- угол сдвига витков между различными парами слоев намотки;
- значение угла скрещивания витков в начале формирования паковки,
- степень замыкания намотки;

- условный диаметр наматываемой нити (ширина жгута);
- габаритные размеры формируемой паковки;
- требуемые (расчетные) размеры пор и направления их смещения по мере роста диаметра намотки и т.д.

Главным параметром, определяющим любую структуру намотки мотальных паковки, является значение угол сдвига витков между различными парами слоев намотки. Именно он оказывает решающее влияние на расположение нитей в структуре намотки и определяет её удельную плотность (тождественно коэффициенту заполнения паковки нитевидным материалом), пористость и проницаемость структуры, направления расположения волокон в объёме паковки. Кроме того, важно учитывать и такие факторы, как форма и габариты паковки, способы её формирования, а также технологические возможности мотального оборудования (например, величина свободного отрезка нити от глазка раскладчика нити до точки входа нити в намотку).

Мотальное оборудование, существующее в текстильном производстве, не позволяет получать требуемые сложные структуры намоток мотальных паковок. Его конструкции, чаще всего, обеспечивают контроль только двух параметров структуры намотки – угла подъема витков перематываемых нитей  $\beta/2$  и шага витков намотки  $h$ , в то время, как для формирования армирующих объемных намоток сложных структур, оно не приспособлено [61]. Это, по нашему мнению, обусловлено тем, что проектировщики современного мотального оборудования, предназначенного для создания намоткой композитных материалов, даже оснащённого ЧПУ, не учитывают большого многообразия существующих и возможных структур намоток, или не знакомы с теоретическими положениями, обуславливающими возможность их формирования. Поэтому, для создания желаемых структур намотки нитей на оправки, закладывают только синхронизацию скоростей вращения оправки (мотальной паковки) и перемещения раскладчика нити вдоль образующей паковки органолептически («на глазок»). При этом, для обозначения формируемых структур, используются такие определения,

как: расположение витков «встык», или «внахлест» [58,61,62]. Изменения структуры, по мере формирования паковки, как в осевом, так и в радиальном её направлениях, при этом не учитываются. Причем, рассматривается расположение витков формируемой паковки только в двух смежных слоях намотки, ошибочно полагая, что дальнейший процесс формирования структуры остается неизменным. Упускается из вида и то обстоятельство, что любая структура намотки нити на паковку определяется конструктивными особенностями мотального оборудования, которое используется для её формирования [63].

Все вышеизложенное обусловлено не отсутствием теоритических разработок в области формирования мотальных паковок сложных структур, а отставанием отечественного текстильного машиностроения от запросов производителей и ученых текстильщиков, особенно в области создания простого по конструкции, мотального оборудования, для формирования мотальных армирующих паковок сложных прецизионных структур.

Следовательно, для расширения возможностей армирования композиционных материалов намоткой, развитие теории процессов формирования мотальных паковок заданной формы, структуры и типоразмеров требует своего дальнейшего развития.

Особый интерес представляет метод создания армирующих основ композиционных материалов большой толщины (элементов композиционных материалов), путем использования разверток намоток заданных структур на плоскость. По сути, развертки намоток на плоскость, могут выполнять роль тканых преформ, но формируемых более дешевым, однопроцессным способом – намоткой нитей на оправки. Данное направление армирования, также требует изучения и дальнейшего развития [60].

В качестве связующих компонентов армируемых развертками намоток материалов, являются различные синтетические смолы, в том числе и термореактивные. При этом применимы все способы их внесения (ввода) в

наполнитель, применяемые для формирования плоских структур композитов. Однако сохраняются и специфичные для намоток способы:

- при «мокроем» способе намотки, смола наносится во время подачи нитей на раскладку;
- при «сухом» способе намотки нитей предварительно пропитывается смолой с последующей термообработкой (при повышенной температуре) без избыточного давления;
- намоткой «препрегов» (однонаправленных лент шириной до 5мм), пропитанных определенным количеством связующего, что дает возможность продления времени хранения полуфабрикатов (заготовок), особенно при глубоком охлаждении.

Завершение процесса изготовления композитов намоткой, заключается в отделочных операциях (механической обработке заготовок).

Применение армирующих намоток с использованием в послойной раскладке нитей на паковках различных структур и составов позволяет варьировать, в широких пределах, комбинации композитов (по сути, создавать многослойный пирог). Однако существующие конструкции мотального оборудования, оснащены только одним приводом и одним механизмом раскладки нити на паковке, что не позволяет использовать в раскладке нескольких систем нитей и изменять структуру намотки нитей в процессе формирования мотальных паковок. Поэтому нельзя изменять и структуру намотки (размеры пор в структуре намотки), что свидетельствует об отсутствии контроля, за долей связующего компонента в общем объеме композиционного материала (что также отрицательно сказывается на прочностных характеристиках конечных изделий). Кроме того, существующее мотальное оборудование, не учитывает изменение «свободного отрезка нити» (расстояния от раскладчика нити до точки входа нити в намотку) и его влияние на армирующую структуру.

Несмотря на указанные недостатки, процесс армирования композиционных материалов намоткой, в настоящее время, получил широкое практическое

распространение и считается одним из самым перспективных технологических процессов производства композиционных материалов. Существующие структуры армирующих намоток обеспечивают до 65% содержания волокнистого материала в общем объеме композита, то есть, создают довольно высокий показатель его заполнения.

Для дальнейшего совершенствования процесса армирования композиционных материалов намоткой необходимо:

- развивать теорию формирования паковок сложных задаваемых расчетным путем прецизионных структур намотки нитей, на оправки заданной формы и требуемых (увеличенных) габаритов;
- совершенствовать намоточное оборудование, применяемое для получения возможности формирования на нем прецизионных (точных) структур намотки нитевидного материала (нитей, жгутов, лент и т.д.);
- разрабатывать методы формирования многослойных толстостенных композиционных материалов на базе разверток намоток на плоскость, с требуемой структурой и заданной ориентацией волокон в структуре конечных изделий.

Для обобщения результатов проведенного анализа текстильных технологий армирования композиционных материалов были проведены исследования, результаты которых сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1.

| №<br>п/п | Способы<br>армирования | Результат сравнительного анализа технологий армирования                 |                                            |                                                                                          |                              |
|----------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|          |                        | Коэффициент<br>заполнения<br>композиты<br>армирующим<br>компонентом, kз | Выходной<br>продукт                        | Трудоемкость<br>и стадийность                                                            | Потери<br>сырья,<br>угары, % |
| 1        | Нетканые<br>полотна    | 0,370                                                                   | Плоские<br>структуры                       | 1) подготовка<br>волокон,<br>2) формование<br>полотна.                                   | до 0,40                      |
| 2        | Ткачество              | 0,620                                                                   | Плоские<br>структуры                       | 1) подготовка<br>нитей основы<br>и утка,<br>2) сновка,<br>3) ткачество,<br>4) обработка. | до 5,00                      |
| 3        | Трикотажные<br>полотна | 0,470                                                                   | Объемные<br>элементы<br>малой<br>прочности | 1) подготовка,<br>2) вязание,<br>3) обработка.                                           | до 4,00                      |
| 4        | Намотки                | 0,785                                                                   | Тела<br>имеющие<br>ось<br>вращения         | перемотка                                                                                | 0,01                         |

Анализ данных таблицы 1 позволяет сделать вывод, о том, что намоточные структуры имеют ряд существенных преимуществ перед другими текстильными

технологическими решениями производства армирующих компонентов композитов. Армирование композиционных материалов с использованием прецизионных структур сомкнутых и замкнутых намоток позволяет, при минимальной трудоемкости процесса и отходах получить продукт с максимально возможным коэффициентом заполнения объема композита волокнистым материалом, одностадийным способом. Применение замкнутых намоток с различной степенью замыкания  $p$ ,  $a$ , следовательно, с расчетной пористостью и проницаемостью структуры позволяет проектировать углерод - углеродный композиционный материал с наперед заданными свойствами. Мотальные паковки заданной (произвольной) формы намотки могут использоваться в качестве армирующих компонентов композиционных материалов при изготовлении различного рода цельных деталей, имеющих ось вращения.

### **Выводы по главе 1**

1. Все, рассмотренные выше текстильные технологии, применяемые при армировании композиционных материалов, имеют право на их использование в производстве композитов и требуют дальнейшего развития, в соответствие с особенностями реализации специфичных свойств, в целях оптимизации качественных параметров выпускаемых на их основе конечных продуктов,

2. Анализ процессов армирования композиционных материалов с использованием текстильных материалов и технологий показал, что широкое применение (волокон, нитей, нетканых материалов, трикотажа, тканей и намоток), обусловлено разнообразием областей их использования и специфичностью свойств каждого из армирующих компонентов.

3. Главным критерием оценки качества создаваемых композиционных материалов, с использованием текстиля в качестве наполнителя, является его долевое содержание в общем объеме композита, по отношению с долевым содержанием связующего материала, а именно - коэффициент заполнения композита армирующим компонентом (волокнистым наполнителем).

4. Долевое содержание наполнителя в композиционном материале зависит от структуры армирующего компонента (структуры волокон, нитей, структуры нетканых материалов, тканей, трикотажа и т. д.), чем выше упорядоченность структуры, тем меньше доля связующего (матрицы) в общем объеме композиционного материала и тем выше их прочностные характеристики.

5. Применение волокон в качестве армирующего материала композиционных материалов требует большого объема связующих смол, при этом структура наполнителя не упорядочена (хаотична), что снижает прочностные характеристики выходного продукта.

6. Формирование тканей и трикотажа из нитей различной природы (углеродных, арамидных, кремнеземных), применяемых в качестве наполнителей композитов, связано со значительными истирающими воздействиями на данные нити, что негативно сказывается на их прочностных характеристиках, приводит к большому объёму отходов (угаров) дорогостоящего сырья и, в конечном итоге, высокой себестоимости конечного продукта

7. Оптимизация технологических процессов армирования композиционных материалов с заданными свойствами и характеристиками заключается в изыскании «коротких технологий», к которым относятся одно – двухпроцессные операции. К таким технологиям относится прецизионная намотка мотальных паковок из нитей, или нитевидных материалов.

8. Главным параметром, определяющим любую структуру намотки мотальных паковки, является значение угол сдвига витков между различными парами слоев намотки. Именно он оказывает решающее влияние на расположение нитей в структуре намотки и определяет её удельную плотность (тождественно

коэффициенту заполнения паковки нитевидным материалом), пористость и проницаемость структуры, направления расположения волокон в объёме паковки.

9. Существующие структуры намотки мотальных паковок не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к ним производителями композиционных материалов, ввиду слабой связанности слоев намотки между собой и склонности их к расслоению при внешних воздействиях, что требует проведения научных исследований по разработке новых армирующих структур намотки.

10. Однопроцессный способ формирования мотальных паковок позволяет, не только снизить истирающие воздействия на нити, сократить отходы дорогостоящего сырья, энерго и трудозатраты, но снизить себестоимость изготовления армирующего материала для производства композитов.

11. Критерием оценки эффективности производства композиционных материалов с заданными свойствами (прочностными, температурными) и требуемых типоразмеров, должна стать себестоимость выпуска единицы продукции (композита и его элементов), которая, прежде всего, определяется стадийностью технологических процессов, трудоёмкостью их производства и понесенными энергозатратами.

## **Глава 2. Исследование структур намоток мотальных паковок и возможности использования их в качестве наполнителей композиционных материалов**

В последние три десятилетия, при армировании композиционных материалов, стали широко использовать намотки и обмоточные механизмы. Чаще всего для этих целей использовалась ленточная обмотка оправок цилиндрической формы (обмотка стеклонитью баллонов для транспортировки сжиженных газов, создание емкостей хранения переработки химических растворов, труб и т.д.). Во всех данных случаях использовалась параллельная намотка лент-жгутов (с гексагональным расположением элементарных волокон-нитей в жгуте) из стеклонитей с последующим, или одновременным нанесением на намотку связующих компонентов (эпоксидных и полиэфирных смол). Данные технологии производства композиционных материалов стали называются «по мокрому», или «по сухому» способу. Таким образом, создаются композиты, обладающие антикоррозионными свойствами и широко применяемые в нефтехимической и газоперерабатывающей отраслях.

Однако все формируемые обычной крестовой намоткой нитей на оправки заготовки имеют ярко выраженные объемные слои, не связанные между собой, что ограничивает области использования получаемых структур в качестве армирующих композиционные материалы оболочек, применяемых в экстремальных условиях (повышенном давлении и перепадах температур) ввиду их склонности к сдвигу и расслоению намотки.

Тем не менее, учитывая высокую производительность процессов намотки, качественные и прочностные характеристики композитов, армируемых намотками, по отношению к изделиям создаваемым по другим технологиям (тканым, трикотажным, нетканым материалам и т.д.), производители композитных

материалов все больше используют намотки и мотальное оборудование, оснащенное ЧПУ. При этом применяются различные структуры намотки на оправки жгутов состоящих из элементарных волокон. Однако отсутствие глубоких теоретических разработок в области формирования новых объёмных структур намотки, обеспечивающих требуемые (поддающиеся расчету) параметры армирования композиционных материалов, затрудняет решение этих вопросов [63].

До сих пор об использовании в качестве армирующих наполнителей композитных материалов сложных, объёмных прецизионных намоточных структур (замкнутых - сотовых, спиралевидных «опережающих», «отстающих», слоисто – каркасных, *p*-замкнутых), а тем более использования их разверток, вообще не велось речи, даже в технических изданиях, что подтверждает научную новизну и актуальность приведенных в работе исследований.

## **2.1. Анализ существующих структур намоток мотальных паковок, применяемых при армировании композиционных материалов**

Несмотря на кажущуюся простоту процессов формирования мотальных паковок, все возможности прецизионных (точных) намоток, обладающих очень большими возможностями, до сих пор не используют в своей работе не только производители, но и проектировщики новых композиционных материалов. Это обусловлено большим многообразием структур намоток, и их производных, о которых не знают, или не принимают их во внимание многие исследователи.

В связи с этим следует отметить, что исследованиями и разработкой новых намоточных структур армирования композитов занимаются не только текстильщики, непосредственно работающие с текстильными волокнами и нитями, но и специалисты IT-технологий, машиностроители, материаловеды, химики. Каждая группа ученых, по своему, решает общую задачу – создания оптимальных намоточных структур армирования и формирования композиционных материалов, при этом вводя «свои» понятия и обозначения, параметров структур намотки мотальных паковок. Отсутствие междисциплинарного взаимодействия исследователей приводит к тому, что возникают не только различные толкования одних и тех же положений теории наматывания, но, что самое главное, обедняет развитие новых направлений в создании новых конструкционных композиционных материалов.

В работе [63] все виды структур намоток мотальных паковок проклассифицированы по главным их параметрам – углу сдвига витков  $\psi_{1,P+1}$ , между различными парами слоёв намотки и углу скрещивания витков  $\beta$  (углу подъёма витков  $\beta/2$ ). Именно эти параметры определяют взаимное расположение нитей (волокон) во всей структуре намоток, обуславливая их прочностные характеристики, удельную плотность намотки, или коэффициент заполнения композита армирующим наполнителем  $k_3$  (заполнение объёма паковок волокнистым материалом), пористость и проницаемость.

Однако, исследователи структур намоток мотальных паковок, кроме общепринятых в теории наматывания, вводят для характеристики структур армирования необоснованные выводы и новые термины. Например, авторы работы [58, с.33], утверждают, что «гексагональная укладка волокон» самая «плотноёмкая» из всех армирующих структур и имеющая коэффициент заполнения объёма волокнистым материалом  $k_3 = 0,907$ .

Так ли это на самом деле? Для ответа на этот вопрос рассмотрим «гексагональную укладку» более подробно, изучив схему расположения волокон

(или нитей в жгуте), представленную на круговой диаграмме цилиндрической намотки, Рисунок 2.1а).

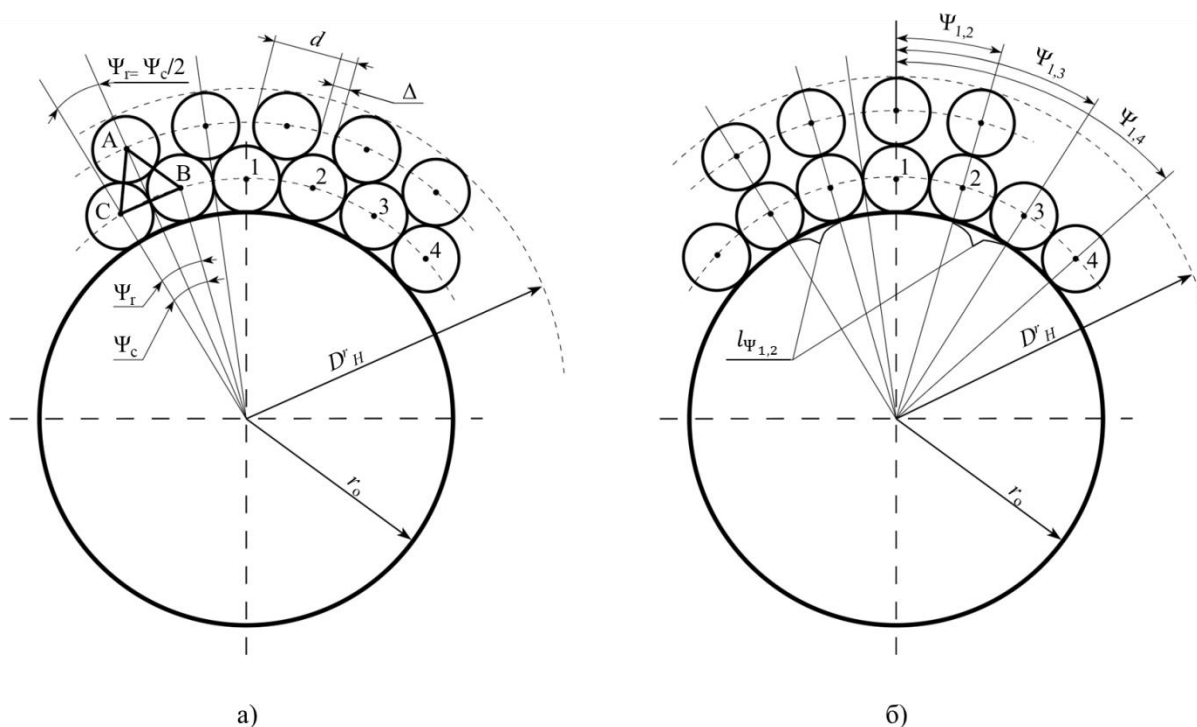


Рисунок 2.1. а) и б) — Схемы расположения волокон, или (нитей в жгуте) при «гексагональной укладке» на круговой диаграмме цилиндрической намотки и б) при сомкнутой структуре намотки.

На рисунке 2.1 использованы обозначения:

$D_n^r$  - диаметр намотки одного объёмного слоя при «гексагональной укладке» волокон (нитей) в жгуте;

$D_n^c$  - диаметр намотки одного объёмного слоя при сомкнутой структуре;

$\Psi_r$  - угол сдвига витков при «гексагональной» укладке нити в жгуте;

$\Psi_c$  - угол сдвига витков при сомкнутой структуре намотки;

$\Psi_{1,2}$ ;  $\Psi_{1,3}$ ;  $\Psi_{1,4}$  - соответственно углы сдвига между витками первой и второй, первой и третьей, первой и четвертой парами слоев сомкнутой намотки.

$r_0$  - радиус оправки;

$d$  - диаметр волокна (нити).

«Гексагональная укладка волокон»- (не намотка), предполагает такое расположение волокон в смежных слоях жгута, когда поперечные сечения нитей образует равносторонний треугольник ABC. При этом объём двух слоев намотки жгутов диаметром  $D_n^r$ , будет меньше диаметра  $D_n^c$  - намотки одиночными нитями того же диаметра при сомкнутой структуре Рисунок 2.1. а) и б). Очевидно, что геометрические расчеты объёмов и удельной плотности намотки сомкнутой и «гексагональной укладки» волокон (нитей), позволили исследователям сделать вывод о максимальной удельной плотности «гексагональной укладки». Однако, практически это возможно только при параллельной укладке волокон (элементарных нитей) в жгуте (ленте), причем только в одном объёмном слое намотки, когда угол скрещивания нитей в жгуте  $\beta = 0$ , а диаметр намотки паковки не более двух диаметров нити  $d$ . Жгуты (ленты), в свою очередь, при их дальнейшей намотке на оправку, можно рассматривать как единую «мононить». Тогда ширина жгута принимается как условный диаметр отдельной «мононити». Очевидно, что тогда при крестовой намотке жгутов (нитей) на оправку, смена направления движения раскладчика нити (жгута), приведет к образованию угла скрещивания жгутов «мононитей»  $\beta$ , а, следовательно, структура намотки (жгутов) перейдёт из параллельной в крестовую намотку [58, с. 16, рис. 1.7]. В этом случае диаметр намотки объёмного слоя намотки возрастет до  $D_n^c$  (до двух диаметров нити).

Следовательно, удельная плотность «гексагональной укладки» снизится. Это наглядно видно из рисунка 2.1 а). Намотка волокон жгутами («гексагональная укладка») на цилиндрическую оправку, при формировании второго и всех последующих объёмных слоёв, (при возрастающем диаметре) намотки, будет создавать не только их крестовую структуру намотки, но и вызывать изменение взаимного расположения волокон (нитей) в самом жгуте, а именно, произойдет раздвижка витков волокон (нитей) в жгуте на величину « $\Delta$ ».

Учитывая вышеизложенное, следует отметить, что «гексагональная укладка» волокон (нитей в жгутах) на мотальную паковку, возможна только теоретически,

при параллельной намотке жгутов, или крестовой намотке жгутов на оболочки большого диаметра, когда искажения взаимного положения волокон (нитей) в жгуте незначительны. Фактически добиться «гексагональной укладки» одиночной нитью, в объёме структуры всей мотальной паковки не представляется возможным.

Кроме того, «гексагональная структура укладки волокон» в жгутах, также подходит под выше указанную классификацию намоток, построенную по значению угла сдвига между витками различных пар слоев намотки  $\psi$ , так как она имеет вполне определённое значение угла сдвига между витками в смежных слоях намотки  $\psi_r$ , который, при любых значениях условного диаметра используемых волокон. Он равен половине угла сдвига витков  $\psi_c$ , соответствующего сомкнутой структуре намотки, сформированной из нитей того же диаметра, и он равен  $\psi/2$ , что наглядно видно из Рисунка 2.1.а).

Сделанные выводы подтверждают материалы, опубликованные в работе [52], где авторами указывается, что: «самая теоретически плотная гексагональная укладка волокон невозможна и даже вредна при производстве композитов...», кроме того, в работе [58, с. 33, рис. 1.22], на графике показаны прочностные параметры композиций, полученные теоретическим и практическим путём, в зависимости от коэффициента заполнения композита волокнистым наполнителем. Из графика видно, что фактическое значение коэффициента заполнения композита при «гексагональной укладке» нитей не превышает значения, соответствующего сомкнутой намотке, составляющего 0,785.

В работе [61] авторами вводятся такие понятия о структурах армирующих намоток, как: «мультиструктурная», «полиструктурная» и «ступенчатая» намотки. При этом оснований для присвоения названия той или иной структурам намотки, базирующихся на конкретных, расчётных технологических параметрах, которые могли бы идентифицировать и воспроизводить именно данный вид структуры намотки нитей на паковки не приводится. Чаще всего, исследователями за отличительные параметры «новых» структур намоток, позволяющие присваивать им «свои» названия, принимаются только шаг намотки и угол подъёма витков  $\beta/2$ .

Иногда число раскладчиков нити (два и более), рассматривается как основание для присвоения «своих названий» получаемым структурам, при этом все отличительные особенности расположения нитей в объёме мотальных паковок, рассматриваются в пределах только одного объёмного слоя намотки, ошибочно считая, что последующие слои намотки будут формироваться аналогично первому, что не соответствует действительности.

Отсутствие теоретических, расчётных обоснований параметров «новых» структур намотки нитей (волокон) на оправки, приводит к тому, что для пояснения своих названий исследователи вводят уточняющие термины: «с нахлёстом», «встык», «ступенями» [61] и т.д., что не даёт научно-обоснованного представления о всей структуре намотки нитевидного материала на паковке в завершённом виде и путях её воспроизведения.

Необходимо так же отметить, что структура намотки мотальных паковок жгутами, уложенными «встык» [58с.19], по сути, является сомкнутой намоткой, так же характеризуемой конкретным значением угла сдвига витков  $\psi_c$ .

Для устранения указанных неопределённостей и более глубокого изучения армирующих структур намотки мотальных паковок по всему их объёму (как в осевом, так и в радиальном направлениях паковки), следует уточнить понятия предложенные нами ранее и используемые в работе [60]:

- «слой намотки» - это расположение витков нити в структуре намотки при движении раскладчика нити вдоль образующей паковки только в одну сторону (слева направо, или обратно);
- «пара слоёв намотки» - расположение витков нитей в структуре намотки за один цикл движения раскладчика нити (при завершении его движения слева направо и обратно);
- «объёмный слой намотки» - заполнение витками нити объёма намотки паковки при увеличении её диаметра (толщины) на два диаметра нити;

$\psi$  - угол сдвига витков намотки, это угол между двумя точками поворота витков различных пар слоев намотки нити на торце паковки;

$\psi_{1,2}$  – угол сдвига между витками первой и второй парами слоёв намотки нити на цилиндрическую оправку;

$\psi_c$  – угол сдвига витков при формировании сомкнутой структуры намотки;

$\psi_{2,3}$  – угол сдвига между витками второй и третьей парами слоёв намотки;

$\psi_{3,1}$  – угол сдвига между витками третьей и первой парами слоёв намотки.

$l\psi_{1,2}$  – длина дуги круговой диаграммы, на которую опирается угол сдвига между витками первой и второй парами слоёв намотки;

$\psi_{m,m+p}$  – угол сдвига между витками  $m^{oi}$  и  $m+p^{oi}$  парами слоёв намотки.

$m = 1, 2, 3, 4$  и т.д. – соответственно витки первой и второй и т.д. пар слоёв намотки;

$p = 1, 2, 3 \dots$  – степень замыкания намотки – т.е. это число двойных ходов нитераскладчика, после которого витки  $p+1^{oi}$  пары слоёв намотки пойдут по виткам первой пары слоёв.

$Z = 0; 1; 2$  или  $3$  – кратность замыкания намотки (значение кратное целому числу оборотов паковки);

$\Pi$  – цикл намотки, или минимальное число двойных ходов раскладчика нити, при котором паковка совершает целое число оборотов, поскольку при этом угол сдвига  $\psi_{1,p+1}$  становится кратным  $2\pi$  (происходит замыкание намотки), то есть  $\Pi = p$ .

Структурами намотки мотальных паковок, наиболее широко применяемыми в качестве армирующих наполнителей композиционных материалов, являются сомкнутые намотки, поэтому рассмотрим их более подробно.

## 2.2. Структуры сомкнутых намоток

Сомкнутыми намотками называются те, у которых шаг витков намотки кратен диаметру наматываемой нити.

Угол сдвига между витками при сомкнутой намотке определяется по формуле профессора Гордеева В.А. [64]:

$$\Psi_c = \frac{2d}{D \sin(\frac{\beta}{2})}, \quad (2.1)$$

где  $d$  - условный диаметр нити, наматываемой на паковку;

$D$  - текущий диаметр намотки мотальной паковки;

$\frac{\beta}{2}$  - угол подъема витков (половина угла скрещивания витков), определяющего механическую прочность намотки, т.е. устойчивость к ее рассыпанию (при намотке на паковки без фланцев).

Следует отметить, что сомкнутых структур намотки, формируемых из одних и тех же нитей, может быть большое множество, с учетом возможности варьирования значениями степени замыкания намотки  $p$  и кратности  $Z$ .

В общем виде, условие, обеспечивающее формирование сомкнутой структуры намотки заданной степени замыкания  $p$  будет справедливо выражение [65]:

$$\Psi_{1,p+1} = 360 \pm \Psi_c \quad (2.2)$$

Условием получения сомкнутой структуры намотки является:

$$\Psi_{1,p+1} = 2\pi p(ki_{oc} - n_1) = \frac{2d}{D \sin \frac{\beta}{2}} = \Psi_c, \quad (2.3)$$

где

$i_{oc} = \frac{n_B}{n_k}$  – величина общего передаточного отношения от паковки к раскладчику нити, при которой на паковке будет формироваться сомкнутая структура намотки

$n_B$  – частота вращения паковки (веретена);

$n_k$  – частота вращения кулачка раскладчика нити;

$n_1 = [ki_{oc}]$  – целая часть числа  $ki_{oc}$ ;

$k$  – число оборотов кулачка раскладчика нити за цикл движения нити (время формирования одной пары слоёв намотки).

Для формирования сомкнутой структуры различной степени замыкания намотки  $p$  необходимо выполнение условия:

$$\Psi_{1,p+1} = \Psi_c = \text{const} \quad (2.4)$$

$$\text{или} \quad 2\pi p(ki_{oc} - n_1) = 2\pi Z \pm \psi_c = 2\pi Z \pm \frac{2d}{D \sin \frac{\beta}{2}}$$

$$2\pi pki_{oc} - 2\pi pn_1 = 2\pi Z \pm \frac{2d}{D \sin \frac{\beta}{2}}$$

$$2\pi pki_{oc} D \sin \frac{\beta}{2} - 2\pi pn_1 D \sin \frac{\beta}{2} = 2\pi Z D \sin \frac{\beta}{2} \pm 2d \quad (2.5)$$

Решая выражение (2.5) по методике, изложенной в работе [60] относительно  $i_{oc}$  получим два значения величин передаточного отношения от раскладчика нити к паковке, при которых на паковке будут формироваться структуры сомкнутых намоток «опережающая» при знаке перед радикалом (+) и «отстающая» при знаке (-):

$$i_{oc} = \frac{p^2 kn_1 + pkz}{p^2 k^2 - \frac{d^2 k^2}{4H^2}} \pm \sqrt{\frac{(p^2 kn_1 + pkz)^2}{(p^2 k^2 - \frac{d^2 k^2}{4H^2})} - \frac{p^2 n_1^2 + 2pn_1 z + z^2 + \frac{d^2}{\pi^2 D^2}}{(p^2 k^2 - \frac{d^2 k^2}{4H^2})}}, \quad (2.6)$$

где  $H$  – высота намотки мотальной паковки.

Из формулы 2.6 следует, что передаточное отношение  $i_{oc}$  выражается иррациональным числом, которое может быть с помощью алгоритма Евклида разложено в подходящую цепную дробь (с целью определения целого числа зубьев передаточного механизма), применяемого для формирования на паковке сомкнутой намотки при заданных:  $d; p; r; z; h; u$  и  $n_1$ .

При этом, ввиду необходимости проведения громоздких и трудоемких вычислений, а также большого ассортимента нитей и нитевидного материала применяемого при армировании композитов, с целью сокращения трудозатрат (при проведении инженерных расчетов), разработана методика определения величин передаточного отношения между валом оправки (паковки) и кулачком раскладчика нити  $i_{oc}$ , с подбором числа зубьев шестерён мотального механизма на ПЭВМ изложенная в работе [60].

Значение степени замыкания намотки –  $p$ , представляет собой своеобразный «раппорт» намотки. Чем выше значение -  $p$ , тем больше будет пересечений витков в смежных слоях намотки между нитями и структура намотки будет прочнее к осевому сдвигу при внешних воздействиях на неё. В отдельных случаях она будет подобна переплетению нитей основы и утка в тканях.

Например, при формировании 3-х сомкнутые намотки, по виду пересечения нитей в одном объёмном слое, подобны переплетению ткани саржа 1/3, так как, после третьего цикла движения раскладчика нити, витки нити 4<sup>й</sup> пары слоёв намотки лягут рядом с витками нити 1<sup>й</sup> пары слоёв (слева – при «опережающей», или справа при «отстающей» намотке). Аналогично - витки нити 5<sup>й</sup> пары слоёв лягут рядом с витками нити 2<sup>й</sup> пары слоёв, витки 6<sup>й</sup> пары рядом с витками нити 3<sup>й</sup> пары слоёв намотки и далее рисунок намотки, завершив цикл раскладки (раппорт намотки)  $p = 3$ , будет повторяться. Места пересечений («пересечки») витков нити в смежных слоях намотки будет соответствовать отношению 1/3 (т.е. нити в одном слое намотки ложатся рядом друг с другом, только через 3 предыдущие). На Рисунке 2.2 показано фото 3-х сомкнутой структуры намотки нитей на паковку.



Рисунок 2.2 — Фото 3х сомкнутой структуры намотки нитей на паковку.

Очевидно, что уравнение (2.6) имеет два решения, в результате которых получим два значения величины  $i_{oc1}$  и  $i_{oc2}$ . Знаки (+), или (-) в формуле 2.6, соответствуют величинам передаточного отношения от раскладчика нити к паковке, обеспечивающим процессы формирования «опережающей» при (+), или «отстающей» при (-) сомкнутых намоток.

Для большей наглядности исследования структур сомкнутых намоток рассмотрим рисунок 2.3, где приведена круговая диаграмма односомкнутой намотки рисунок, где точка  $A_1$  соответствует началу намотки нити от торца паковки, а  $l$  соответствует положению (смещения) витка нити на угол сдвига  $\psi_c$  за время одного цикла движения нитераскладчика (слева, или справа от точки  $A_1$ ). У «опережающих» структур сомкнутых намоток витки  $p + 1^{ой}$  пары слоёв намотки будут ложиться слева от витков  $1^{ой}$  пары слоёв, а у «отстающей» справа.

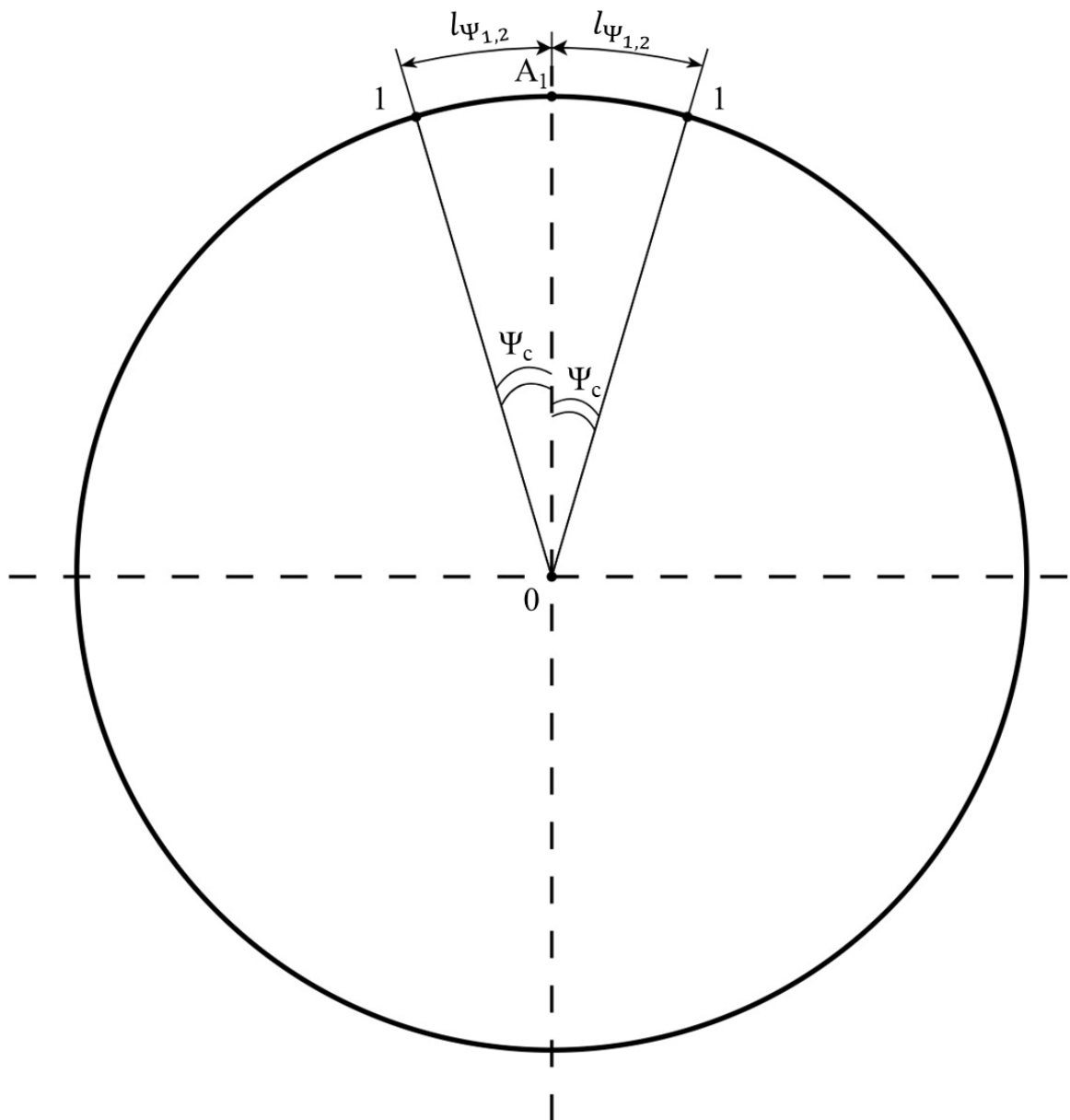


Рисунок 2.3 — Круговая диаграмма односомкнутой катушки.

Так же процесс формирования «опережающих» и «отстающих» сомкнутых намоток удобно изучать по построению их разверток на плоскость.

На Рисунке 2.4 а) показана развертка односомкнутой «опережающей», а на Рисунке 2.4 б) «отстающей» намоток.

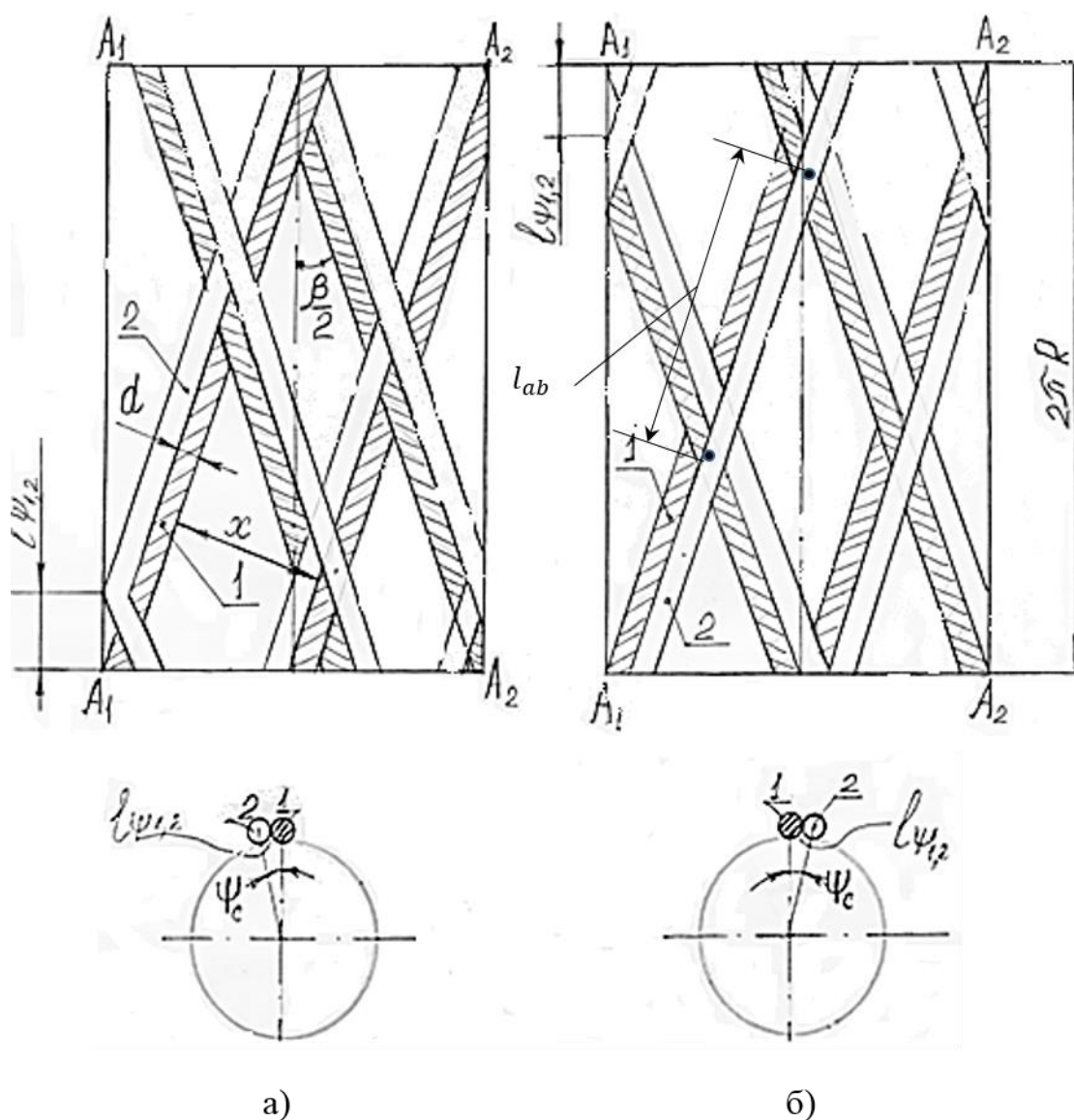


Рисунок 2.4 а) — Развертка и круговая диаграмма односомкнутой «опережающей» обмотки. б) Развертка и круговая диаграмма односомкнутой «отстающей» обмотки.

Данные особенности структур сомкнутых обмоток приобретают особое значение при формировании наполнителей (армирующих заготовок) композиционных материалов, которые будут подвергаться большим внешним нагрузкам, действующим по известным направлениям (крылья самолетов, тормозные колодки и т.д.). Правильная ориентация волокон арматуры, по отношению к направлению прилагаемых внешних нагрузок, в совокупности с

использованием высоких степеней замыкания намотки  $p$ , позволяет проектировать их высокие прочностные характеристики и исключить (затруднить) срыв отдельных витков от структуры намотки и препятствовать её расслоению.

Данная методика проектирования структур сомкнутых намоток позволяет, расчётным путем, определять величину передаточного отношения между раскладчиком нити и мотальной паковкой, необходимую для их формирования. При этом выбор структуры намотки производится с учетом заданных прочностных параметров армирующих заготовок композиционных материалов. Данная методика уже использована при получении конечных продуктов, показанных на фото Рисунок 2.5 а) и б), где представлены оболочки сомкнутой структуры намотки в виде конечных продуктов.

Методика применима к прецизионным мотальным машинам любых габаритов и конструкций, что делает ее универсальной. Она справедлива для формирования сомкнутых намоток на паковках заданных типоразмеров из нитевидного материала любого сырьевого состава, причем с различным значением поперечника – (условного диаметра нити, ширины жгута или лент) и требуемой степенью замыкания намотки  $p$ .



Рисунок 2.5 а) — Оболочки сомкнутой структуры намотки в виде конечных продуктов



Рисунок 2.5 б) — Оболочка сомкнутой структуры намотки в виде конечного продукта

Фото конечных продуктов композитов, армированных сомкнутыми намотками:

- а) из стеклянных нитей с различной степенью замыкания намотки  $p$ ;
- б) оболочка из арамидных нитей, сформирована 12-ти сомкнутой «опережающей» намоткой.

Расчет параметров намоток сомкнутых структур, в зависимости от степени их замыкания  $p$ , показывает, что в общем случае, длина «настилов» нити (расстоянием между пересечениями витков) в одном объемном слое намотки -  $l_{ab}$  определяется степенью замыкания -  $p$ . Точки пересечения витков нити образуют ромбы, показанные на рисунке 2.6, у которых малые диагонали  $f$  будут оставаться неизменными с ростом диаметра намотки, а большие диагонали  $l_{ab}$  – длина настилов нитей, будут расти пропорционально диаметру намотки паковки (упрочняющей оболочки) –  $D$ . Очевидно, что с ростом диаметра намотки мотальной паковки, точки пересечения витков будут смещаться относительно друг друга по спиралям Архимеда. При этом угол подъёма витков  $\beta/2$  будет уменьшаться. При изготовлении армирующих заготовок малой толщины, данные изменения будут незначительны, и не окажут существенного влияния на прочностные свойства проектируемых изделий.



$$f = \frac{H}{PW_c} = \frac{2H}{W_c P} = \frac{2H}{ki_0 P}, \quad (2.10)$$

где

$n_1 = [ki_0]$  – целая часть числа,

$k$  – число оборотов кулачка нитеводителя за цикл движения нити.

Соответственно, из рисунка 2.7 (а) и 2.7 (б) видно, что длина «настилов» у односомкнутой намотки больше  $l_{ab} > l_{ab}$ , чем у двухсомкнутой и  $l_{ab}$ , чему трехсомкнутой намоток.

В общем случае, длина «настилов»  $l_{ab}$ , для структур  $p$ -сомкнутых намоток может быть определена по формуле:

$$l_{ab} = \frac{l_{1,2}}{\cos \frac{\beta}{2}} \quad (2.11)$$

Так как

$$l_{1,2} = \frac{\pi D}{P},$$

то

$$l_{ab} = \frac{\pi D \cos \beta / 2}{P} \quad (2.12)$$

Анализ формулы 2.12 показывает, что чем больше степень замыкания намотки  $p$ , тем меньше длина «настилов»  $l_{ab}$  нити, а, следовательно, ниже и подвижность витков нити в структуре намотки относительно друг друга, что следует учитывать при определении областей применения армируемых сомкнутыми намотками композиционных материалов.

На Рисунке 2.7 а) и б) показаны фото «одно» и «двенадцатисомкнутых» намоток.

Из данных фото видно, что чем выше степень замыкания намотки  $p$ , тем короче будут «настилы», (обозначены черными точками), а, следовательно, и прочнее будет связь витков нити друг с другом в смежных слоях армирующей намотки.

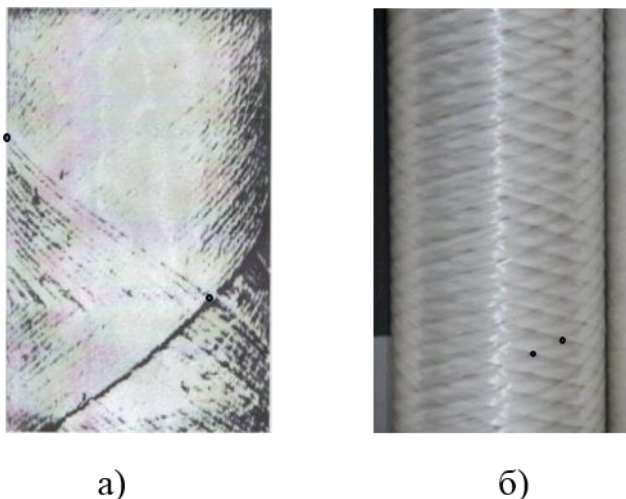


Рисунок 2.7 — а) Фото структур одно и б) двенадцатисомкнутой намоток.

Максимальная и равномерная, как в осевом, так и в радиальном направлениях паковки, удельная плотность намотки мотальных паковок сомкнутой структуры, по сравнению с любыми иными текстильными наполнителями, обуславливает получение композиционных материалов с максимальным коэффициентом заполнения композита армирующим компонентом. А высокая прочность закрепления малых «настилов» витков нити, при больших значениях степени замыкания намотки  $p$ , обеспечивает высокую прочность структуры выходного композиционного продукта.

### 2.3. Структуры замкнутых (разомкнутых) намоток

Замкнутые намотки относятся к разомкнутым прецизионным намоткам [65]. Разомкнутые (то есть не сомкнутые) структуры намотки мотальных паковок, это

те, у которых витки при намотке на паковку (оправку) не ложатся вплотную друг к другу, а смещаются на заданный шаг больше диаметра нити.

Принимая в выражении (2.6) значение диаметра наматываемой нити  $d = 0$  получим формулу для определения величины передаточного отношения от нитераскладчика к паковке, при котором на ней будут формироваться  $p$ -замкнутые намотки:

$$i_{oz} = \frac{1}{k} \left( n_1 + \frac{Z}{p} \right) \quad (2.13)$$

Структуры замкнутых намоток характеризуются тем, что они имеют сотовую (пористую) структуру, а угол сдвига между витками различных пар слоев намотки  $\Psi_{1,p+1}$  рассчитывается по формуле:

$$\Psi_{1,p+1} = 2\pi p(ki_o - n_1) = 0, \quad (2.14)$$

где  $p = 1; 2; 3; \dots$  – степень замыкания намотки, или число двойных ходов раскладчика нити вдоль образующей паковки (слева направо и обратно), по истечению которого витки  $p+1$ ой пары слоев намотки лягут на витки первой пары слоев;

$n$  - число оборотов кулачка раскладчика нити за цикл движения нити;

$i_o$  - общее передаточное отношение от раскладчика нити к паковке, создаваемое мотальным механизмом;  $ki_o$ ;

$n_1$  - целая часть числа  $n = [ki_o]$ .

Все замкнутые намотки обладают сотовой структурой, причем, с увеличением степени замыкания намотки  $p$  число пор в структуре намотки увеличивается, а их размеры уменьшаются. Высота ячейки (пор), измеряемая в направлении параллели намотки определяется по формуле 2.9, а ширина ячейки пор, измеряемая в меридианном (осевом) направлении паковки определяется по формуле 2.10:

Если в выражении (2.13) принять  $k = 1$ , то получим формулу для определения передаточного отношения при формировании замкнутых намоток:

$$i_{oz} = n_1 + \frac{Z}{p} \quad (2.15)$$

Угол сдвига между последующим и предыдущим витками намотки (точками поворота витков на торце паковки):

$$\psi_1 = \frac{360}{p} \text{ т.е. } \psi_{0-1} = \psi_1 \quad (2.16)$$

Из выражения (2.15) следует, что увеличение  $Z$  (при том же значении  $p$ ) равнозначно увеличению  $n_1$  а замкнутые намотки, где отношения  $\frac{Z}{p}$  одинаковы, не отличаются друг от друга. Следовательно, для изучения всего множества замкнутых намоток достаточно рассмотреть намотки, формируемые при  $Z=0$ ;  $Z=1$  и различных значениях  $p$ .

При  $Z=0$ ,  $i_{oz} = \frac{n_1}{k}$ , а угол сдвига между витками  $m^{\text{ой}}$  и  $m+p^{\text{ой}}$  парами слоев намотки:

$$\psi_{m,m+p} = \pi p (k i_o - n_1) = 2\pi p [k \frac{n_1}{k} - n_1] = 0 \quad (2.17)$$

В этом случае на паковке формируется однозамкнутая («жгутовая») намотка.

При  $Z=1$  и  $p=1$  получим:

$$i_{oz} = (n_1 - \frac{1}{1}) \frac{1}{k} = \frac{(n_1+1)}{k} \quad (2.18)$$

$$\psi_{m,m+p} = 2\pi p (k i_o - n_1) = 2\pi p (n_1 + 1 - n_1) = 2\pi p \quad (2.19)$$

В данном случае так же, при любом значении  $p$ , на паковке будет формироваться однозамкнутая («жгутовая») намотка.

При  $Z=1$  и  $p>1$  возможно формирование сотовых (пористых) структур намоток, отличающихся степенью замыкания  $p$ .

Учитывая то, что одним из самых важных параметров намоточных армирующих структур композиционных материалов, является коэффициент заполнения  $k_z$ , определим вначале удельную плотность однозамкнутой намотки, развертка которой показана на рисунке 2.8.

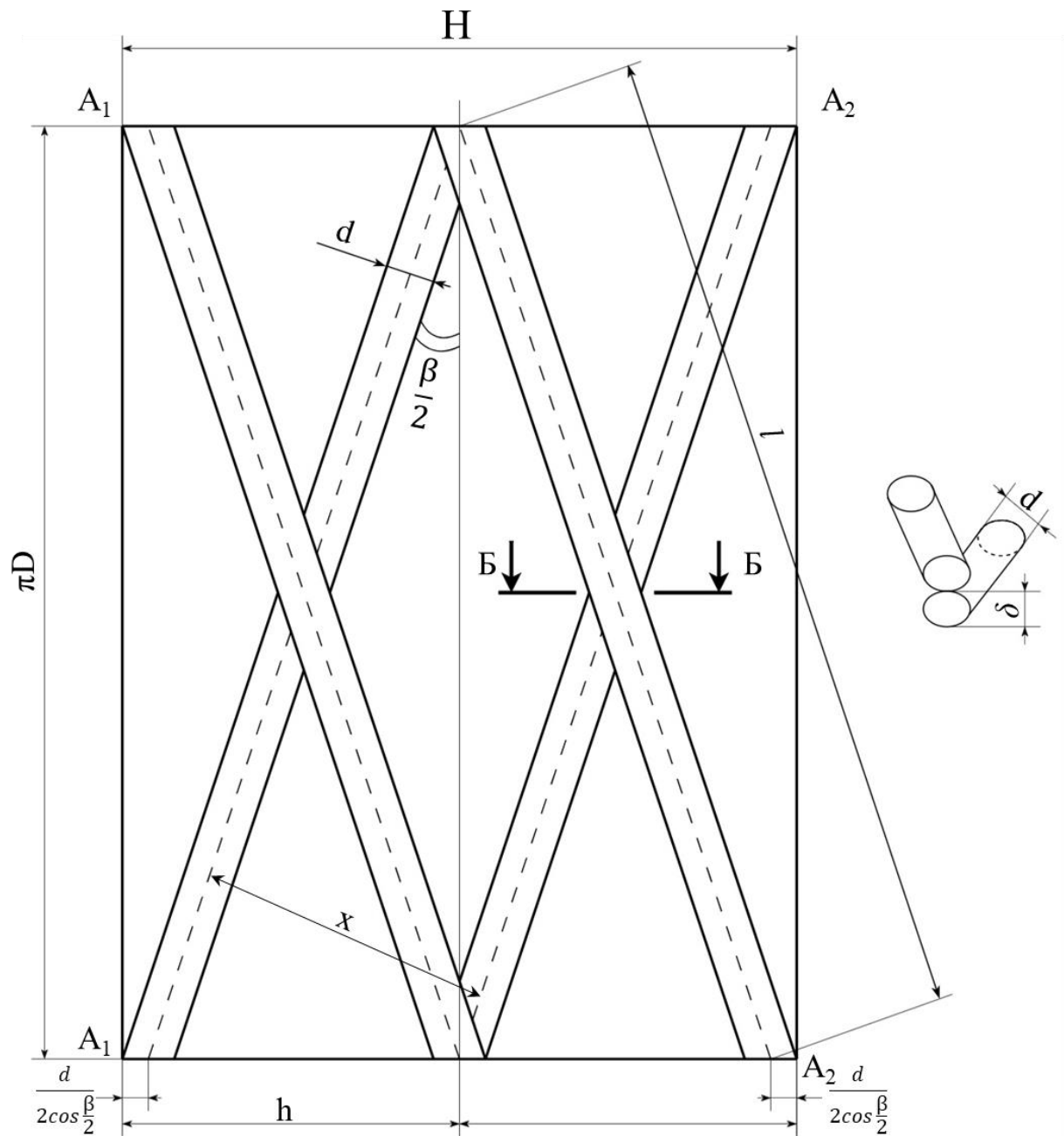


Рисунок 2.8 — Развертка однозамкнутой («жгутовой») намотки.

Число витков намотки на паковке, формируемых за один двойной ход нитераскладчика (цикл его движения):

$$W = ki_o \quad (2.20)$$

В рассматриваемом случае  $ki_o = 4$  (что так же наглядно видно на рисунке 2.8.).

Примем следующее условие, что наматываемая нить (волокно) круглого сечения, в ходе намотки в местах пересечения витков, сминается так, что величина смятой нити становится равной  $\delta$ , пропорциональной диаметру круглой нити, как показано Вид Б-Б на рисунке 2.8, или Рисунке 2.21.

Теоретически предполагается, что в однозамкнутых намотках витки последующих пар слоев идут строго по виткам предыдущих слоев. Тогда длина нити, намотанной на паковку за первый цикл движения раскладчика нити, будет определена по формуле:

$$L = \pi(D_0 + \delta)W / \cos \frac{\beta}{2}, \quad (2.21)$$

где  $\delta$  – толщина нити в месте пересечения витков;

$D_0$  – диаметр оправки;

$W$  – число витков, наматываемых на паковку за время цикла движения нитераскладчика;

$\beta$  – угол скрещивания витков.

Длина нити, намотанной на паковку за второй цикл движения раскладчика, составит;

$$L_2 = \pi(D_0 + 3\delta)W / \cos \frac{\beta}{2} \quad (2.22)$$

Длина нити наматываемой на паковку за  $m^{\text{ий}}$  цикл движения раскладчика нити:

$$L_m = \pi[(D_0 + (2m-1)\delta)W / \cos \frac{\beta}{2}] \quad (2.23)$$

Общая длина нити, намотанной на паковку за  $m$  циклов движения раскладчика: нити

$$L = \sum_1^m L_m = \frac{\pi W}{\cos \frac{\beta}{2}} [D_0 + D_0 + D_0 + 3\delta + \dots + D_0 + (2m-1)\delta] \quad (2.24)$$

Очевидно, что значение  $D_0$  повторится в скобках  $m$  раз, а сумма

$D_0 + D_0 + D_0 + 3\delta + \dots + D_0 + (2m-1)\delta = m^2 D_0$ , так как складываются нечетные числа.

Тогда общая длина нити на паковке:

$$L = \frac{\pi W}{\cos \frac{\beta}{2}} m$$

Число витков в одной паре слоев намотки из рисунка 2.8:

$$W = \frac{2(H \cos \frac{\beta}{2} - d)}{\pi D \sin \beta / 2}, \quad (2.25)$$

где  $H$  – высота намотки паковки;

$D$  – текущий диаметр намотки;

Так как  $h = \pi D \tan \frac{\beta}{2}$ ,

тогда,

$$L = \frac{2\pi(H \cos \frac{\beta}{2} - d)(mD_0 + m2\delta)}{\pi D \sin \beta / 2 \cos \frac{\beta}{2}} = \frac{2\pi(H \cos \frac{\beta}{2} - d)(mD_0 + m2\delta)}{D \sin \beta} \quad (2.26)$$

При выводе формулы (2.26) мы пренебрегли уменьшением величины угла скрещивания витков  $\beta$  по мере возрастания текущего диаметра намотки  $D$ . Данное допущение обусловлено тем, что диаметр нити (волокна)  $d$ , наматываемого на оправку много меньше ее диаметра  $D_0$ .

Диаметры намотки паковки, после каждого цикла движения раскладчика нити, определяются по формулам:

$$D_1 = D_0 + 2\delta ;$$

$$D_2 = D_0 + 4\delta ;$$

.....

$$D_m = D_0 + 2m\delta.$$

Объем нити на паковке после  $m$  циклов движения нитераскладчика:

$$V = \frac{\pi H}{4} (D_m^2 - D_0^2) = \frac{\pi H}{4} (D_0^2 + 4m\delta D_0 + 4m^2\delta^2 - D_0^2) = \pi H \delta (mD_0 + m^2\delta) \quad (2.27)$$

Масса нити на паковке, соответствующая указанному объёму намотки:

$$G = LT/10^5 = \frac{4T(H \cos \frac{\beta}{2} - d)(mD_0 + m2\delta)}{10^5 D \sin \beta} \quad (2.28)$$

Удельная плотность намотки паковки:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{4T(H\cos\frac{\beta}{2}-d)(mD_0+m_2\delta)}{10^5 D \sin\beta \pi H \delta (mD_0+m_2\delta)} = \frac{4T(H\cos\frac{\beta}{2}-d)}{10^5 D \sin\beta \pi H \delta},$$

Величиной диаметра нити можно пренебречь, так как  $d \ll H \cos \frac{\beta}{2}$ .

Тогда

$$\gamma = \frac{4TH\cos\frac{\beta}{2}}{10^5 D \sin\beta \pi H \delta} = \frac{4T\cos\frac{\beta}{2}}{\pi B \delta 10^5 \sin\beta}$$

Учитывая, что  $\pi D = l \cos \frac{\beta}{2}$ , где  $l$  – длина витка на развертке в сантиметрах, поэтому :

$$\gamma = \frac{4T}{10^5 \sin\beta l \delta} = \frac{T}{250000 l \delta \sin\beta} \text{ [г/см}^3\text{]} \quad (2.29)$$

Данная формула соответствует формуле проф. Гордеева В.А., представленной в учебнике [64, с.44]. Качество, если  $l$  и  $d$  измерять не в сантиметрах, а в метрах и  $\gamma$  в г/см<sup>3</sup>, которая характеризует удельную плотность однозамкнутых (жгутовых) намоток:

$$\gamma = \frac{T}{250 l \delta \sin\beta} \text{ [г/м}^3\text{]}. \quad (2.30)$$

Следует отметить, что удельная плотность  $\gamma$  – замкнутых намоток зависит от степени замыкания намотки, так как приращение объёмного слоя намотки толщиной  $\delta$  будет происходить в соответствии с циклами движения раскладчика нити. Очевидно, что удельная плотность  $\gamma$  – замкнутых намоток будет определяться по формуле:

$$\gamma = \frac{pT}{250 l \delta \sin\beta} \quad (2.31)$$

Как показывают проведенные исследования, структур  $p$  – замкнутых намоток, фактическое значение удельной плотности намотки их превышает расчетные значения, что обусловлено несколькими факторами, влияющими на взаимное расположение нитей в структуре намотки. Это и форма поперечника наматываемой нити, и величина ее натяжения в процессе формирования паковки, степень прессования намотки укатывающими роликами (если они применяются),

но главное влияние оказывает величина степени замыкания намотки  $p$ . Чем выше значение степени замыкания  $p$ , тем прочнее структура замкнутых намоток. В общем случае при формировании замкнутых намоток степень замыкания должна удовлетворять условию:

$$p \leq \left[ \frac{x}{d} \right] = \left[ \frac{\pi D \sin \beta / 2}{d} \right] \quad (2.32)$$

Очевидно, что при  $p = \left[ \frac{x}{d} \right]$ , намотка из замкнутой перейдет в сомкнутую, с максимальной удельной плотностью намотки.

Вычислив значение удельной плотности намотки замкнутой структуры, и принимая во внимание вид сырья, из которого формируется намотка, легко определить коэффициент заполнения паковки армирующим компонентом  $k_3$  из выражения:

$$\gamma = k_3 \gamma_n, \quad (2.33)$$

где

$\gamma_n$  - удельная плотность волокна, из которого изготовлена нить (г/см<sup>3</sup>).

На рисунках 2.8; 2.9 и 2.10 показаны развертки одно, 2<sup>х</sup> и 3<sup>х</sup> замкнутой намотки, а на Рисунке 2.11 приведено фото 23-х замкнутой структуры намотки.

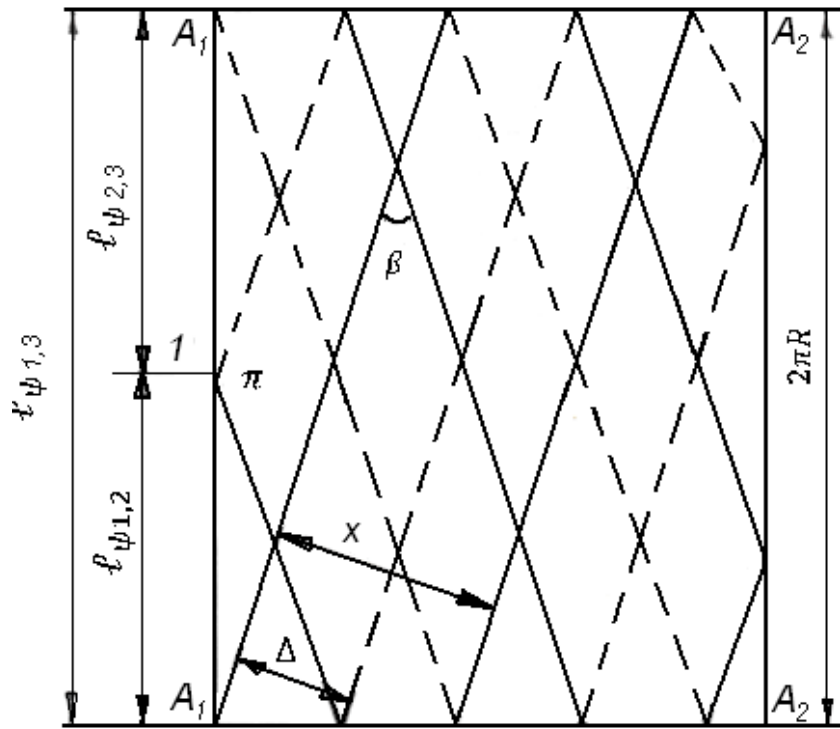


Рисунок 2.9 — Развертка двухзамкнутой катушки.

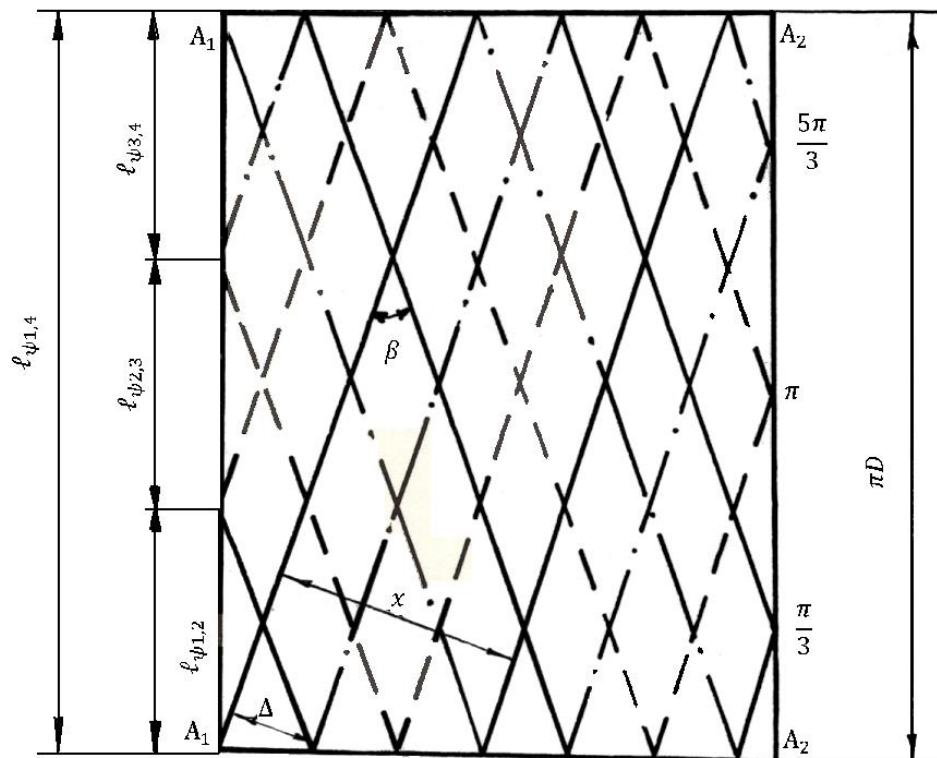


Рисунок 2.10 — Развертка трехзамкнутой катушки.



Рисунок 2.11 — Фото 23-х замкнутой намотки.

Как видно из фотографии, замкнутые намотки имеют сотовую (пористую, ячеистую) структуру, размеры пор могут задаваться расчетным путем, что может быть использовано в инжиниринге объёмных (толстостенных) композитных материалов, при выборе соотношения долей армирующего текстильного материала (намотки заданной степени замыкания –  $p$ ) и связующего (смола и клеевых составов). Упорядоченное расположение витков намотки нитей и стабильность размеров пор в структуре замкнутых намоток, а главное – возможность изменения (регулирования) их размеров, обуславливает широкие возможности создания на их базе как цельных композитов, так и отдельных элементов (препрегов), путем применения разверток намоток замкнутой структуры с экспресс проклеиванием, или термофиксацией нитей по линии разреза намотки.

Прочностные характеристики замкнутых намоток (устойчивость к рассыпанию, воздействию внешних нагрузок), ранее не исследовались, ввиду отсутствия мотального оборудования, позволяющего формировать данные структуры. Теоретические исследования, проводимые нами показывают, что такие параметры мотального механизма, как  $P$ ;  $\ell$ ;  $n_1$ ;  $D$ , напрямую влияют на угол скрещивания витков –  $\beta$ , создаваемый мотальным механизмом в начале наматывания паковки.

Замкнутые намотки с увеличением степени замыкания намотки  $p$ , будут иметь более высокий коэффициент заполнения объёма паковки волокнистым материалом, при сохранении стабильной пористой структуры, но размеры пор при этом будут соответственно уменьшаться.

Намотки замкнутой структуры высокой степени замыкания –  $p$  могут использоваться при армировании заготовок для углерод-углеродных композиционных материалов, в виде базовых преформ различных типоразмеров и формы, причем совместно, или вместо волокнистых элементов объемного плетения различной сложности, набираемых из углеродных стержней.

## 2.4. Спиралевидные структуры намоток

Промежуточное положение между сомкнутыми и замкнутыми намотками занимают намотки спиралевидной структуры, у которых поры смещаются в радиальном направлении паковки по спиралям Архимеда, т.е. точки пересечения витков в различных слоях намотки, лежащие в одной плоскости перпендикулярной оси паковки, смещены по поверхности намотки паковки на расстоянии в пределах:

$$0 < l_y < \frac{d}{\sin \frac{\beta}{2}}, \quad (2.34)$$

где  $l_y$ - длина дуги на торце паковки, соответствующая смещению витков на угол сдвига находящийся в пределах (при опережающей намотке).



Рисунок 2.12 — Фото спиралевидной намотки.

Для формирования спиралевидной структуры угол сдвига между витками  $m^{\text{ой}}$  и  $m+1^{\text{ой}}$  парами слоёв должен намотки должен находиться в пределах:

при опережающей намотке

$$360Z + \Psi_c > \Psi_{m,p+m} > 360Z \quad (2.35)$$

или при отстающей намотке

$$360Z > \Psi_{m,p+m} > 360Z - \Psi_c, \quad (2.36)$$

где  $m = 1; 2; 3; 4; \dots$  – номер текущей пары слоев намотки;

$Z = 1; 2; 3; \dots$  - кратность замыкания намотки.

Точки А и В на рисунке 2.12, соответствуют «опережающей» и «отстающей» спиралевидным намоткам. Спирали, образованные местами пересечения витков в смежных слоях намотки, у «опережающих» намоток будут закругляться по ходу часовой стрелки, а у «отстающих» против хода часовой стрелки, Рисунок 2.13.

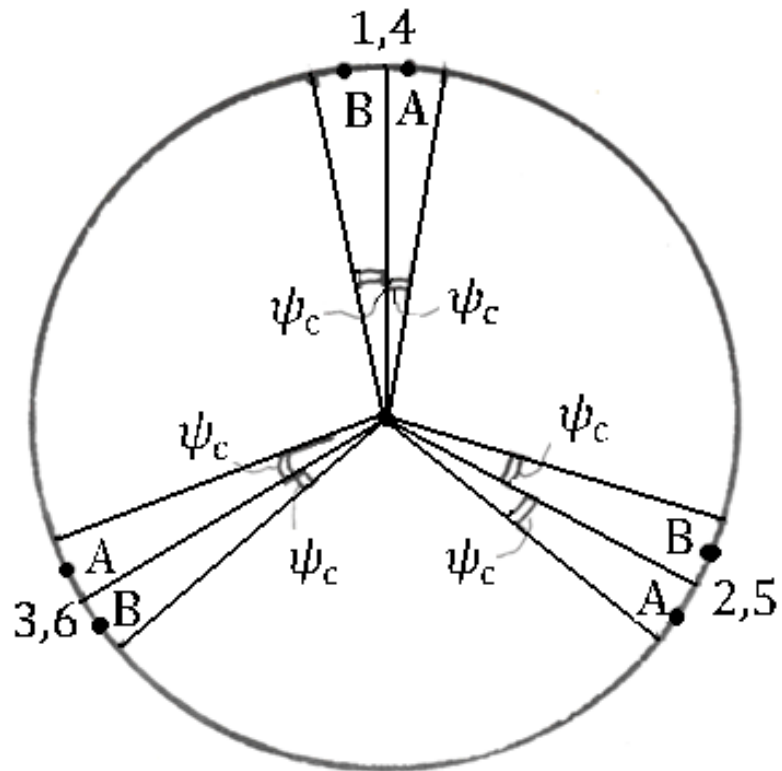


Рисунок 2.13 — Круговая диаграмма спиралевидной намотки.

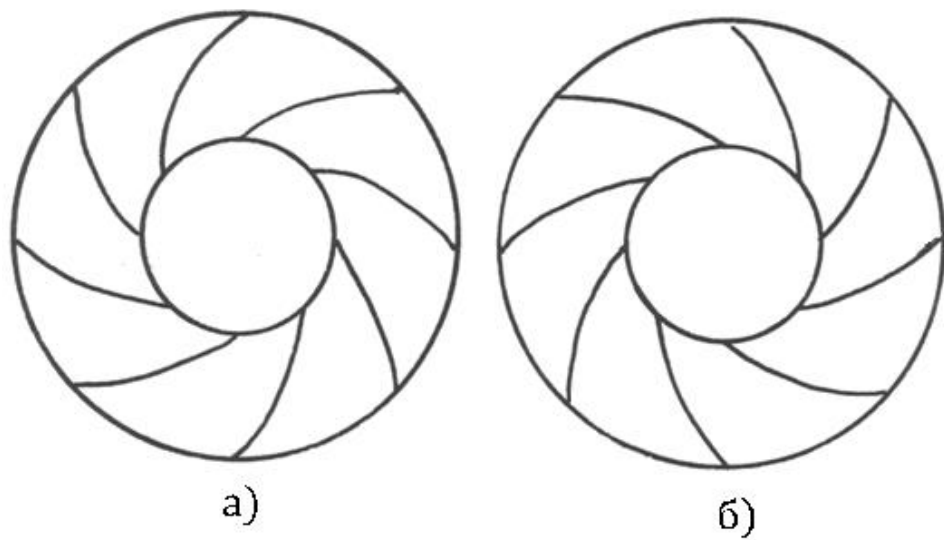


Рисунок 2.14 — Направление спиралей у опережающей и отстающей спиралевидных намоток, где: а) соответствует положению пересечения витков у «отстающих» спиралевидной намотки, а б) у «опережающих».

Схема процесса формирования спиралевидной намотки показана на рисунке 2.15.

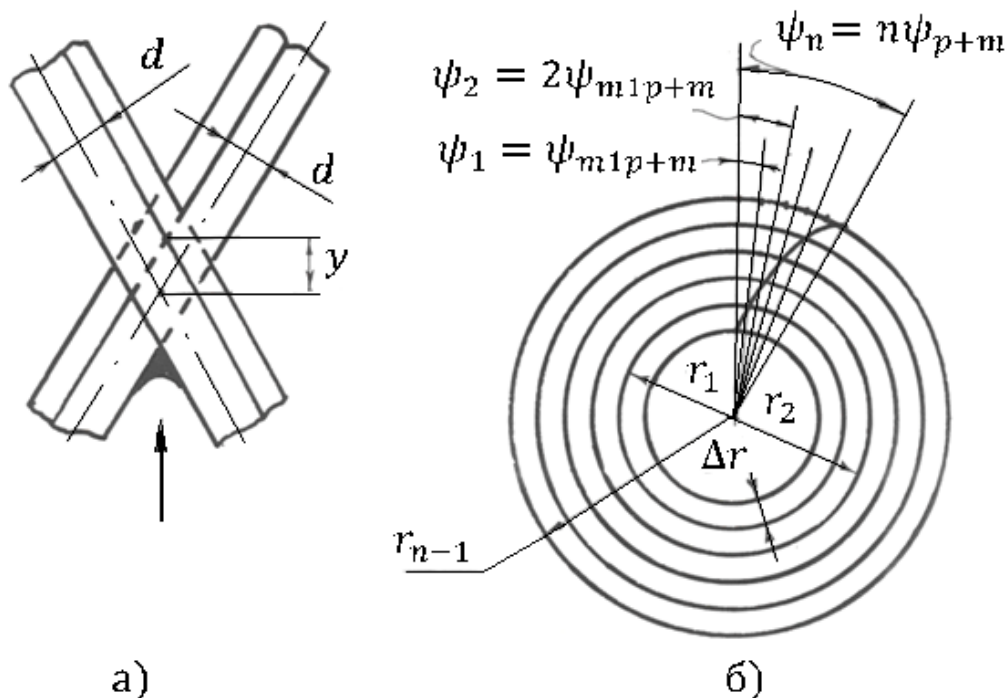


Рисунок 2.15 — а) Схема смещения витков и б) процесса формирования спиралевидной «опережающей» намотки.

Витки спиралевидной намотки, формируемой на оправке радиусом  $r$  из нитей диаметром  $d$ , рисунок 2.15 а), смещаются относительно предыдущих на заданную величину (в данном случае на половину диаметра нити  $d/2$ ), образуя косые поры. Текущий радиус намотки спиралевидной намотки определяется по формуле [66]:

$$r = \sqrt{r_o^2 + \left(\frac{h_k}{4\pi i_o}\right)^2} + \frac{T \times \phi}{2\pi N \gamma \times 10^5} \text{ см}, \quad (2.37)$$

где  $r$  – радиус оправки, на которую наматывается нить;

$h_k = 2\frac{H}{k}$  – шаг канавки кулачка нитераскладчика;

$H$  – высота паковки (размах раскладчика нити);

$k$  – общее число оборотов кулачка раскладчика нити за один его двойной ход;

$T$  – линейная плотность нити, текс;

$\gamma$  – удельная плотность намотки нити на паковку,  $\text{г/см}^3$ .

За заданное число  $p$  циклов движения раскладчика нити паковка повернётся при формировании намотки на угол:

$$\Delta\varphi = 2\pi k p i_o, \quad (2.38)$$

а приращение радиуса намотки  $\Delta r$  [см], составит:

$$\Delta r = \frac{T \times k \times p \times i_o}{H \times \gamma \times 10^5} \text{ см}, \quad (2.39)$$

где  $i_o$  - общее передаточное отношение мотального механизма.

При этом витки  $(m+p)^{oi}$  пары слоёв намотки сместятся относительно витков  $m^{oi}$  пары слоёв на угол:

$$360 Z + \Psi_c > \Psi_{m,p+m} > 360 Z \quad (2.40)$$

Пересечение луча (Рис.2.13. б)  $\Psi_1 = \Psi_{m,p+m}$  с окружностью радиуса:

$$r_1 = \sqrt{r_o^2 + \left(\frac{h_k}{4\pi i_o}\right)^2} + \Delta r \quad (2.41)$$

обозначит первую точку формируемой спирали.

При повороте паковки на угол  $2\Delta\varphi$  радиус намотки возрастет на  $2\Delta r$ , а угол сдвига между первой  $m^{oi}$  и  $(m+p)^{oi}$  парой слоёв станет равным  $2\Psi_{m,p+m}$

Отложив луч из центра вращения паковки под углом  $\Psi_2 = 2\Psi_{m,p+m}$ , получим в месте его пересечения с окружностью радиуса  $r_2 = r_1 + \Delta r = r_o + 2\Delta r$  вторую точку формируемой спирали и т.д. (Рисунок 2.15 б).

Нетрудно видеть, что между углом сдвига  $\Psi_n$  и  $\Psi_{m,p+m}$ , (где  $n$  - номер очередного объёмного слоя намотки толщиной  $\Delta r$ ) и радиусом намотки  $r_n$  существует прямопропорциональная зависимость, т.е.

$$r_n = \sqrt{r_o^2 + \left(\frac{h_k}{4\pi i_o}\right)^2} + a \cdot \psi_n, \quad (2.42)$$

где  $a$  - коэффициент пропорциональности.

Проведенные расчеты показывают, что формируемые спиральные поры являются не чем иным, как спиралями Архимеда. Кривизна винтовых спиралей («гелис») зависит от величины угла сдвига витков и от толщины наматываемой

нити (жгута, ленты), т.е. линейной плотности нити и удельной плотности намотки формируемой паковки.

Величина передаточного отношения от оправки к кулачку раскладчика нити, необходимого для формирования спиралевидной структуры намотки находится в пределе:

$$I_{oc} < i_{ocв} < i_{oz}, \quad (2.43)$$

где  $i_{oz}$  - передаточное отношение между оправкой (паковкой) и кулачком нитераскладчика при формировании на оправке  $p$ - замкнутой структуры намотки нитей на оправку;

$I_{oc}$  - передаточное отношение между оправкой (паковкой) и кулачком раскладчика нити при формировании на оправке  $p$  - сомкнутой структуры намотки нитей.

Структура спиралевидной намотки нитей на оправки отличается тем, что у «отстающих» намоток поры, (точки пересечения витков), смещаются на заданную величину в каждом последующем слое относительно предыдущего по ходу часовой стрелки, а, у «опережающих», наоборот, против хода часовой стрелки. Это свойство имеет важное значение и его следует использовать при формировании армирующих компонентов цельных композитов винтовой формы (корабельные винты, шнеки, турбины, лопасти летательных аппаратов и т.д.).

Все рассмотренные выше виды структур намоток мотальных паковок (их развертки и круговые диаграммы) относятся к паковкам цилиндрической формы. Формирование мотальных паковок более сложной формы, используя данные структуры, крайне затруднительно, из-за неравновесного (неустойчивого) положения нитей на наклонных и кривых плоскостях, вследствие малого сцепления витков между собой и (их трения о намотку). Следовательно, это приводит к нарушению условия равновесности намотки профессора А.П. Минакова (приводящего к слетам витков с поверхности паковок):

$$tg\theta \geq \mu, \quad (2.44)$$

где  $\theta$  - угол геодезического отклонения витка (угол образованный главной нормалью к поверхности намотки и перпендикуляром в точку наматывания, проходящем в плоскости перпендикулярной оси паковки;

$\mu$  - коэффициент трения нити о намотку (зависит от сырья, из которого изготавливают нить и числа витков в намотке).

## 2.5. Структуры 3D намоток мотальных паковок

Традиционные способы формирования мотальных паковок, используемых при армировании композитов, осуществляются одним раскладчиком нити (одной нитью), в результате чего на паковке формируются послойные структуры намотки, с малым количеством связей в смежных слоях намотки. Такие структуры склонны к расслоению и сдвигу витков намотки нитей относительно друг друга, при приложении к ним осевых нагрузок,

Для создания высокопрочных армирующих прецизионных структур намоток мотальных паковок и устранения вышеуказанных недостатков, разработан способ формирования намоткой объёмных армирующих структур в виде структур 3D намоток.

Данный способ формирования мотальных паковок заключается в одновременном использовании двух и более систем нитей, при этом одна система нитей используется в качестве базовых слоев намотки, а другие системы нитей образуют перевивочные структуры. Все используемые структуры намоток интегрируются в единую объёмную прецизионную (точную) триаксиальную структуру, которую называем 3D намоткой.

### **2.5.1. Методика формирования прецизионных структур 3D намоток**

Способ формирования намоткой высокопрочных структур в виде 3D намоток предусматривает использование специального мотального оборудования, позволяющего производить намотку одновременно несколькими нитями (системами нитей) на одну оправку. При этом необходимо точно синхронизировать работу раскладчиков нитей, для обеспечения условий формирования единой, прецизионной структуры, а именно, каждый раскладчик нити должен обеспечивать строго заданный угол сдвига между витками различных пар слоев намотки. Последовательность процесса формирования структур 3D намоток рассмотрим с использованием схемы её разреза.

На рисунке 2.16 показана схема триаксиальной сомкнутой структуры 3D намотки в разрезе, сформированной двумя раскладчиками нитей и двумя системами нитей базовой и перевивочной структур (поперечники нитей базовой структуры не заштрихованы, а нитей перевивочной структуры заштрихованы).



намотки на оправке 3, обеспечивая тем самым, их скрепление между собой, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях паковки (по координатным осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ ). В результате на паковке формируется связанная по горизонтали и вертикали объёмная 3D структура намотки с суммарным углом сдвига витков  $\psi_{3d}$  и чередованием нитей 2/1 (две нити базовой и одна нить перевивочной структуры), что для тканых структур соответствует рисунку переплетения нитей в ткани саржа 2/1.

В структуре 3D намоток места перевивки нитей различных систем (структур) между собой называются - «пересечки». В ходе формирования структуры 3D намотки «пересечки» базовой и перевивочной нитей размеренно смещаются на величину  $s$  относительно друг друга в смежных слоях намотки по винтовым спиралям. При этом витки намотки базовых и перевивочных нитей располагаются в 2х направлениях под углом скрещивания витков  $\beta$  и в третьем направлении по оси  $z$  по винтовым спиралям Архимеда, с приращением текущего радиуса (толщины) намотки мотальной паковки (по оси  $z$ ), определяемом полярным уравнением:

$$r(\varphi) = a + b(\varphi), \quad (2.45)$$

где

$\varphi$  – угол поворота паковки;

$a = d$  – условный диаметр нити базовой структуры;

$b$  – приращение диаметра намотки (с учетом смятия нитей) по завершении формирования одного объёмного слоя намотки (фиксированное число), равное  $d$  – условному диаметру нити, или  $\delta$  – толщине нити в месте пересечения витков, с учетом её смятия.

Следует отметить, что места пересечения нитей в структуре 3D намоток смещаются пропорционально углу поворота паковки на угол  $\varphi$ , со смещением, относительно друг друга, на величину

$$s = \pi D \operatorname{ctg} \beta/2 \quad (2.46)$$

Особенностью процесса формирования 3D намоток является то, что нити базовой и перевивочной структур раскладываются одновременно на одной мотальной паковке разными раскладчиками нитей, получающими движение от отдельных приводов, что позволяет автономно управлять всеми используемыми структурами, и, при выполнении определенных условий, которые будут описаны ниже, создавать большое многообразие структур 3D намоток.

Следует так же отметить, что все структуры 3D намоток имеют не ортогональное строение, т.е. нити взаимно переплетающихся систем располагаются, по отношению друг к другу, не под прямым углом, (витки нитей базовых слоев располагаются под углом скрещивания  $\beta$ , а вместе с витками перевивочной структуры по винтовым спиралям Архимеда).

Такое расположение нитей в структуре 3D намоток позволяет рассматривать их как изотропные материалы, т.е. имеющие одинаковые свойства в различных направлениях мотальной паковки. **Очевидно, что такие намоточные структуры, обладающие перевивочными связями между нитями всех систем (используемых в их формировании), по трем и более направлениям координатных осей  $x$ ,  $y$ , и  $z$ , являются новыми и их можно назвать структурами «3D намоток».**

### **2.5.2. Условия и технологические особенности формирования прецизионных структур 3D намоток**

Известно [60], что в зависимости от значения угла сдвига витков  $\psi$  все структуры крестовых намоток мотальных паковок подразделяются на:

«замкнутые»; «сомкнутые»; «спиралевидные» и их производные (в зависимости от степени замыкания намотки- $p$ ). Замкнутые намотки являются фундаментальными, так как на их базе строятся сомкнутые, спиралевидные, их производные и другие виды структур намоток.

Интегрировать разные структуры намоток нитей в единую паковку, без нарушения её формы (цилиндричности), возможно только при условии сохранения постоянства значений углов сдвига  $\psi$ , образующихся между витками намотки нитей, (создаваемого всеми раскладчиками нитей), в течение всего процесса формирования «базовых» и «перевивочных» структур, т.е. при условии:

$$\psi_{3д} = \psi_6 + \psi_{\pi} = \text{const}, \quad (2.47)$$

где:

$\psi_{3д}$  - суммарный угол сдвига витков, образующийся при формировании 3D намотки всеми используемыми системами нитей;

$\psi_6$  – угол сдвига между витками различных пар слоев намотки, создаваемый при формировании «базовой» структуры;

$\psi_{\pi}$  - угол сдвига между витками различных пар слоев намотки, создаваемый при формировании «перевивочной» структуры.

Для формирования прецизионных сомкнутых структур 3D намоток условием формирования является:

$$\psi_{3д} = \psi_6 + \psi_{\pi} = \psi_c = \text{const}, \quad (2.48)$$

То есть необходимо сохранение равенства углу сдвига витков  $\psi_c$ . Несоблюдение данных условий неизбежно приводит к нарушению целостности структуры 3D намотки, образованию не санкционированного наложения витков намотки друг на друга (образованию жгутов) и, как следствие, нарушению формы намотки.

При проектировании необходимой структуры 3D намотки так же необходимо учитывать:

- вид волокнистого материала (линейной плотности нитей, текс);

- требуемое количество систем базовых и перевивочных структур;
- требуемые параметры структуры намотки (требуемое значение угла скрещивания витков  $\beta$ , шага намотки  $h$ );
- требуемая степень замыкания намотки  $p$ ;
- габаритных размеров мотальной паковки, с учетом ее формы (высота паковки  $H$ );
- возможности мотального оборудования - способность его создавать требуемые расчетные значения параметров структур 3D намотки (требуемой величины передаточного отношения от паковки к раскладчикам нитей, требуемого значения угла скрещивания витков  $\beta$ , в начале формирования паковки) и т.д.

На базе исходных данных необходимо рассчитать значения углов сдвига между витками используемых систем нитей и определить  $\psi_{3д}$  суммарный угол сдвига витков 3D намотки.

Выполнение условий, описанных выражениями (2.47) и (2.48), можно используя для формирования базовых и перевивочных структур 3D намотки, «опережающую» и «отстающую» структуры сомкнутых намоток, так как они уже имеют одинаковый угол сдвига между витками различных пар слоев намотки, но формируемый при различных значениях  $i_o$  величины передаточного отношения от паковки к раскладчику нити. Следовательно, при одновременной намотке двух систем нитей на одной паковке, разными раскладчиками нитей, которые будут формировать, один «опережающую», а другой «отстающую» сомкнутые намотки, результирующей структурой будет сомкнутая 3D намотка. В данном случае обе структуры нитей будут, в равной степени, выполнять функции и базовой и перевивочной намоток. Рисунок 2.17 а).

Ранее было доказано, что каждому значению угла сдвига  $\psi$ , между витками различных пар слоёв намотки, соответствует вполне определенное значение величины передаточного отношения от паковки к раскладчику нити  $i_o$ , определяемое по формуле (2.6).

Необходимо так же отметить, что при решении уравнения (2.6) величиной  $\frac{d^2}{\pi D^2}$  можно пренебречь без ущерба для точности расчетов, если условный диаметр нити  $d$  много меньше диаметра намотки паковки  $D$ , однако при намотке на оправки композитов жгутов (лент) значительной ширины, пренебрегать данным выражением нельзя.

На рисунке 2.4 а) и б) точка  $A_1$  соответствует началу намотки нити от левого торца паковки, а точка 1 соответствует положению (смещения) витка нити на угол сдвига  $\psi_c$  за цикл за время одного цикла движения раскладчика нити (слева, или справа от точки  $A_1$ ). У «опережающих» структур сомкнутых намоток витки  $p + 1^{ой}$  пары слоёв намотки будут ложиться слева от витков  $1^{ой}$  пары слоёв, а у «отстающей» справа. При этом витки намотки на торце паковки будут смещаться относительно друг друга на величину  $l_{\psi 1,2}$  – (длина дуги круговой диаграммы, на которую опирается угол сдвига между витками первой и второй парами слоёв намотки).

Очевидно, что обе структуры сомкнутых намоток формируются с одинаковым углом сдвига витков  $\psi_c$ , но, образованными при различных значениях  $i_{oc}$ , поэтому, именно на базе данных структурах «близнецах» сомкнутых намоток, используя одновременно два раскладчика нити, была сформирована прецизионная структура 3D сомкнутой намотки, которая показана на рисунке 2.17 фото 13-ти сомкнутой 3D намотки, а на рисунке 2.18 фото 3-х сомкнутой структуры 3D намотки сформированной тремя нитераскладчиками из трех видов нитей (черные, коричневые и белые).



Рисунок 2.17 — Фото 13-ти сомкнутой 3D намотки, сформированной двумя системами нитей (черные и белые).



Рисунок 2.18 — Фото 3-х сомкнутой 3D намотки, сформированной тремя системами нитей (черные, оранжевые и белые).

На Рисунках 2.17 и 2.18 отчетливо видно, как структуры намотки (базовая и перевивочные) пересекаются (интегрируются) друг с другом в местах пересечения витков, обеспечивают перевивку нитей всех систем в горизонтальном и вертикальном направлениях (по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ ) и, совместно, формируют общую сомкнутую структуру 3D намотки. Ввиду того, что витки структур непрерывных нитей проходят через все слои намотки мотальной паковки, обеспечивается связанность и устойчивость её структуры к сдвигу и расслоению.

Данные особенности структур  $p$ -сомкнутых 3D намоток приобретают особое значение при формировании наполнителей (преформ) композиционных материалов, которые будут подвергаться большим внешним нагрузкам, действующим по известным направлениям (крылья самолетов, тормозные колодки и т.д.). Правильная (заданная) ориентация нитей (волокон арматуры), по отношению к направлению прилагаемых внешних нагрузок, с помощью выбора угла скрещивания витков  $\beta$ , в совокупности с использованием высоких степеней замыкания намотки  $p$ , позволяет проектировать их высокие прочностные характеристики и исключить сдвиг витков и расслоение намотки.

Однако следует отметить, что для формирования прецизионных структур 3D намоток необходимо специальное мотальное оборудование, оснащенное ПЭВМ.

### 2.5.3. Процесс формирования прецизионных структур 3D намотки из двух и более систем нитей различной линейной плотности

Процесс формирования прецизионных структур 3D намотки из двух и более систем нитей различной линейной плотности является более сложным, так как для этого необходимо выполнение условия:

$$\psi_{3D} = \psi_6 + \psi_{II} = (\psi_{c1} + \psi_{c2}) = \psi_c = \text{const} , \quad (2.49)$$

где

$\psi_{c1}$  – угол сдвига витков, создаваемый нитями одной линейной плотности (одного диаметра);

$\psi_{c2}$  – угол сдвига витков, создаваемый нитями другой линейной плотности (другого условного диаметра);

$$(\psi_{c1} + \psi_{c2}) = \psi_c \text{ или кратен ему.} \quad (2.50)$$

То есть, для формирования прецизионных структур 3D намотки из двух и более систем нитей различной линейной плотности, необходимо обеспечить работу каждого из раскладчиков нитей базовых и перевивочных нитей, с расчетной величиной передаточного отношения, формирующих суммарный угол сдвига между витками различных пар слоев намотки (базовой и перевивочной структур)  $\psi_{3D}$ , который удовлетворял бы условию постоянства и равенства (или кратности) его  $\psi_c$  - углу сдвига витков, обеспечивающего формирование результирующей сомкнутой структуры 3D намотки из нитей с суммарным диаметром равным диаметрам базовой и перевивочной нитей.

Несоответствие условий (2.49) и (2.50) приводит к тому, что сомкнутая структура может быть сформирована только нитями одной или двух систем, а одна из систем нарушит общую структуру намотки. Решить данную проблему можно приняв за базовую намотку структуру, создаваемую одним раскладчиком нити,

раскладывающим нить большего диаметра, а перевивочные структуры, формируемую другими раскладчиками нитей, выполнять из более тонких нитей, диаметры которых кратны диаметру нити базовой структуры. Схема процесса формирования 3D намотки из двух систем нитей различной линейной плотности (различного условного диаметра используемых нитей) показана на рисунке 2.19. а) и б).

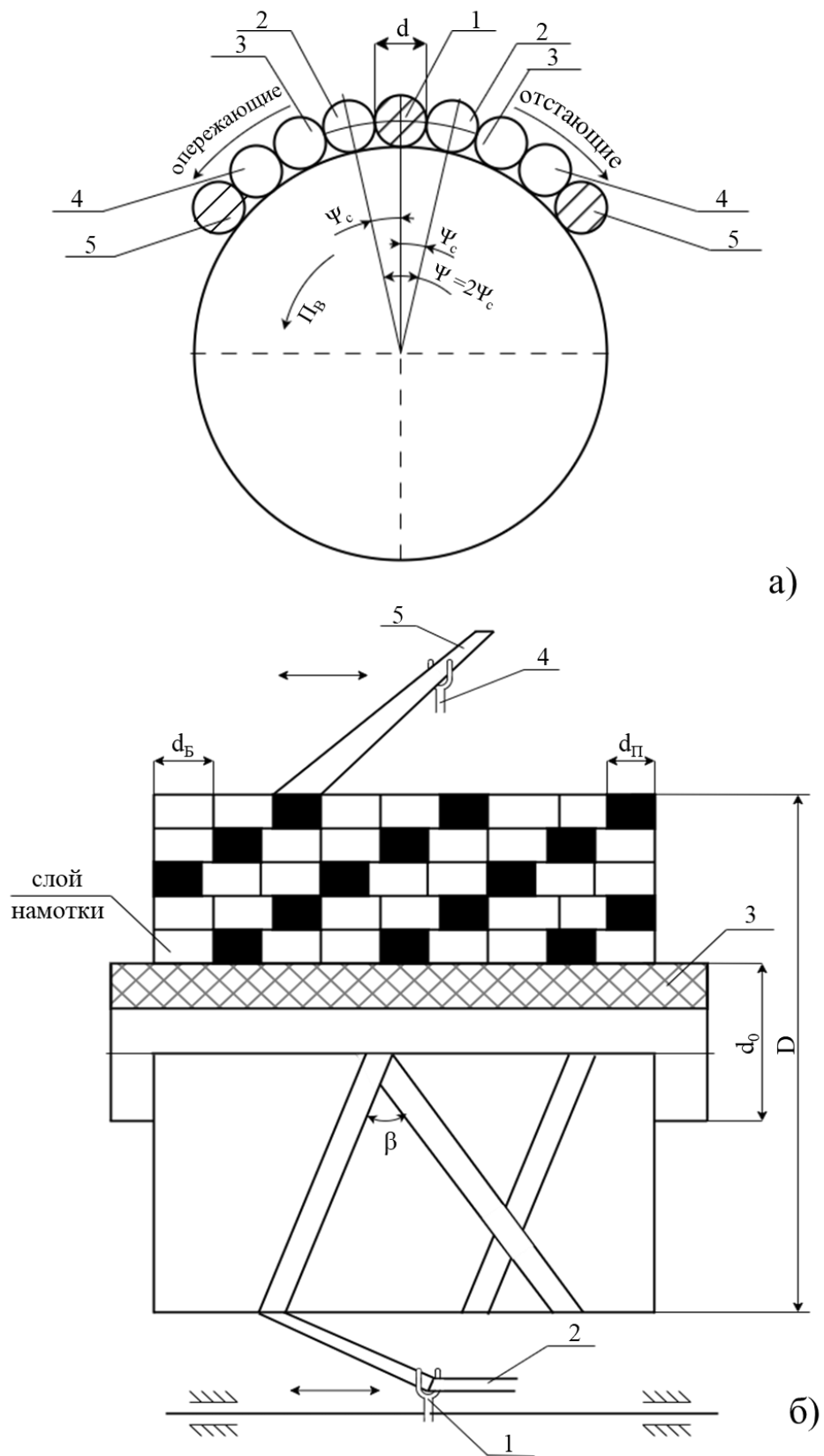


Рисунок 2.19 — а) Круговая диаграмма формирования сомкнутой 3D намотки;  
 б) Схема процесса формирования 3D намотки из двух систем нитей различной линейной плотности.

Раскладчик нити 1, с нитью 2, совершает возвратно-поступательные движение вдоль образующей, вращающейся с постоянной скоростью вокруг своей оси мотальной паковки (оправки) 3, при этом формирует нитью 2 слои 3D намотки базовой структуры, (на разрезе намотки поперечники нити 2 не заштрихованы), а раскладчик нити 4, с перевивочной нитью 5, (на разрезе намотки поперечники нити 5 заштрихованы) формирует перевивочную структуру, проходящую через все слои базовой структуры 3-D намотки, причем условный диаметр перевивочной нити 5 меньше и кратен условному диаметру нити намотки базовой структуры (в два раза). Нити базовой и перевивочной структур образуют суммарный угол сдвига  $\psi_c$ , между витками базовой и перевивочной структур, необходимый для формирования сомкнутой структуры 3D намотки. Нити перевивочной структуры проходят через слои базовой структуры с чередованием в смежных слоях 2/1, (т.е. две нити базовой и одна нить перевивочной структур), осуществляя их закрепление между собой (по подобию переплетения ткани сажа 2/1).

**Пример.** Необходимо создать многослойную мотальную паковку 3D намоткой с базовой сомкнутой структурой, устойчивой к расслоению при эксплуатации готовых изделий в экстремальных условиях, с шириной раскладки препрега  $H = 150$  мм и толщиной стенки паковки (3D намотки) 50 мм из пленочных («площеных») углеродных нитей.

Для формирования базовой структуры 3D намотки принимаем «площеные» углеродные нити с условным диаметром (толщиной)  $a_b = 1$  мм и шириной  $d_b = 5$  мм, а в качестве нитей перевивочной структуры принимаем углеродные нити с (поперечными сечениями) - условным диаметром (толщиной)  $a_n = 1$  мм и шириной  $d_n = 2,5$  мм (в два раза уже нитей базовой структуры). Диаметр оправки, для формирования многослойной 3D намотки  $d_0 = 100$  мм, шаг намотки нитей базовой структуры  $h_b = 10$  мм, а шаг намотки нитей перевивочной структуры  $h_n = 12,5$  мм.

Технология процесса формирования многослойной заданной структуры 3D намотки из нитей с различной линейной плотностью (различного условного диаметра поперечника нитей), состоит в следующих операциях:

- Раскладчиком нити 1, совершающим возвратно-поступательное движение вдоль образующей вращающейся вокруг своей оси мотальной паковки 3 (оправки), нить базовой структуры 2 раскладывается с углом сдвига витков  $\psi_6$ , образуя 15 витков базовой сомкнутой структуры намотки с заданным шагом намотки  $h_6 = 10$  мм;

- Одновременно раскладчик нити 4, нитью 5 формирует перевивочную структуру сомкнутой намотки с углом сдвига витков  $\psi_n$  (раскладывается 12 витков) с шагом  $h_n = 12,5$  мм и приращением намотки на высоту  $2a = 2\text{мм}$  (сумма толщин нитей базовой и перевивочной структур), при этом формируется первый слой 3D сомкнутой намотки.

Для формирования мотальной паковки с заданной толщиной стенки, равной 50 мм требуется намотать на оправку 25 слоев базовой и перевивочной структур намотки. Схема формирования многослойной структуры 3D намотки мотальной паковки из нитей различной линейной плотности (сомкнутой базовой структуры) показана на рисунке 2.19 б). На Рисунке 2.19 а) показана круговая диаграмма (схема) процесса формирования требуемого угла сдвига между витками различных пар слоев 3D намотки сомкнутой структуры  $\psi_c$ , или кратным ему, который определяется суммарным углом сдвига между витками различных пар слоев намотки базовой  $\psi_6$  и перевивочной  $\psi_n$  структур.

$$\psi_{3D} = \psi_6 + \psi_n. \text{ кратен } \psi_c \quad (2.51)$$

Использование предлагаемого способа формирования многослойной мотальной паковки 3D намоткой текстильных нитей на оправки, позволяет получать прочные, устойчивые к сдвигу и расслоению многослойные армирующие структуры «преформ» полимерных композиционных материалов, используемых при эксплуатации конечных изделий в экстремальных условиях (повышенном давлении, влажности и резком перепаде температуры). На рисунке 2.20 показана фотография разреза толстостенной (толщиной 20 мм) 3D намотки,

сформированной из нитей различной линейной плотности (углеродных – базовой структуры и вискозных – перевивочной структуры).



Рисунок 2.20 — Фотография разреза толстостенной (толщиной 20 мм) 3D сомкнутой намотки, сформированной из углеродных и вискозных нитей различной линейной плотности.

Данные особенности структур  $p$ -сомкнутых 3D намоток приобретают особое значение при формировании наполнителей (преформ) композиционных материалов, которые будут подвергаться большим внешним нагрузкам, действующим по известным направлениям (ракеты, крылья самолетов, тормозные колодки и т.д.). Заданная ориентация нитей (волокон арматуры), по отношению к направлению прикладываемых внешних нагрузок, с помощью выбора угла скрещивания витков  $\beta$ , в совокупности с использованием высоких степеней замыкания намотки  $p$ , позволяет проектировать их высокие прочностные характеристики и исключить сдвиг витков и расслоение намотки.

Однако следует отметить, что для формирования прецизионных структур 3D намоток необходимо специальное мотальное оборудование, оснащенное ПЭВМ.

#### **2.5.4. Методы построения разверток на плоскость 3D намоток**

При изучении структур и процесса формирования 3D намоток мотальных паковок удобно пользоваться построением разверток каждой структуры на плоскость. Нить, при её наматывании на цилиндрическую поверхность представляют собой винтовые линии, или траектории точек движущихся с постоянной скоростью по образующей цилиндра вращения, в то время, как сама образующая с постоянной угловой скоростью вращается вокруг оси цилиндра (паковки). Высота  $h$ , на которую перемещается точка наматывания вдоль оси цилиндра (паковки) при одном полном обороте, называется шагом намотки (шагом винтовой линии). Метод построения развертки намотки (винтовой линии), или траектории движения точки наматывания нити на плоскость, показан на рисунке 2.21.

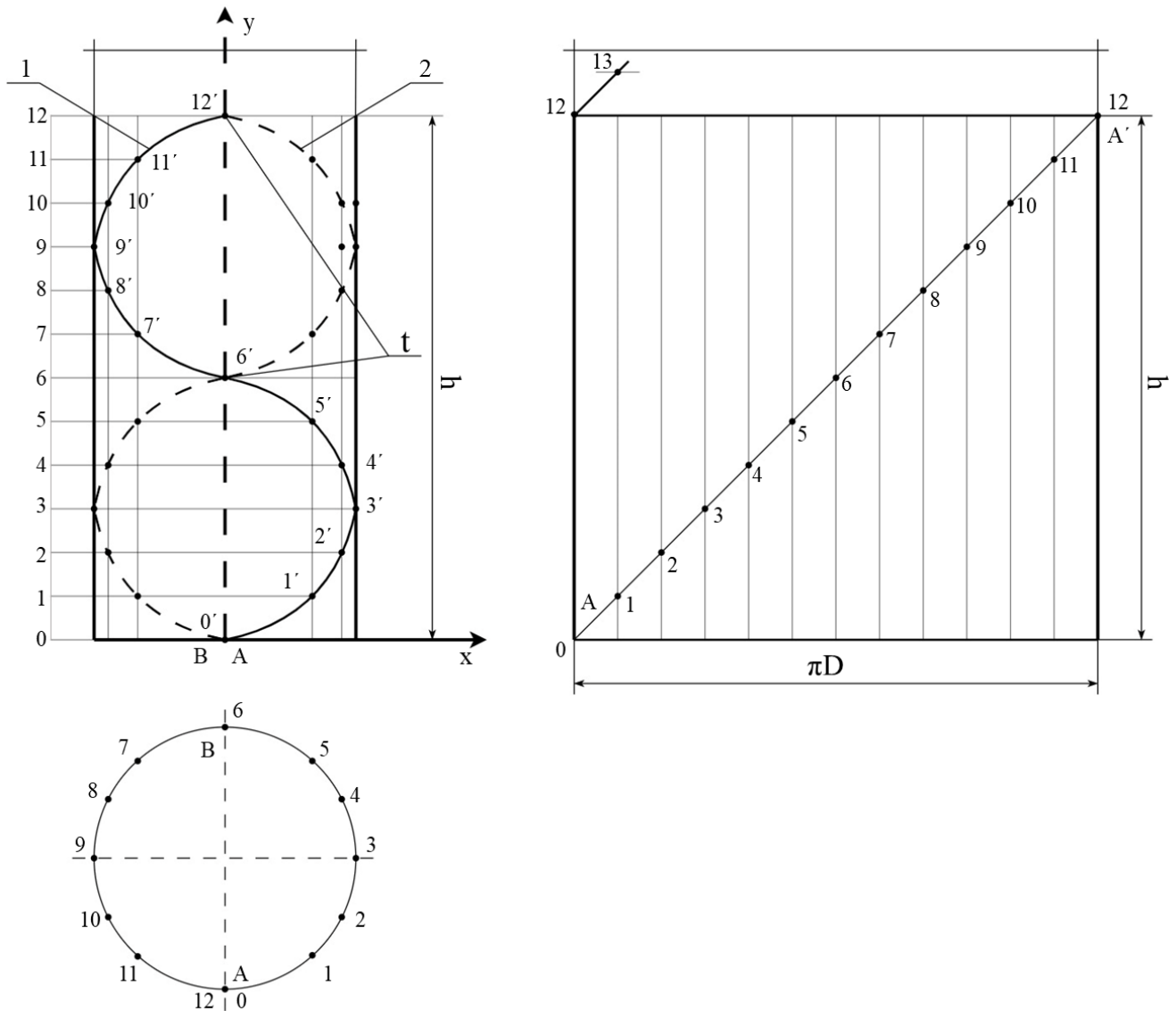


Рисунок 2.21 — Метод построения развертки на плоскость 3D намоток.

Из рисунок 2.21 видно, что горизонтальная проекция винтовой линии движения нити совпадает с проекцией цилиндрической оправки (паковки), т.е. является торцевой окружностью диаметра  $D$ . Для построения фронтальной проекции (развертки на плоскость), окружность и шаг намотки делят на равное количество частей (на 12). В пересечении горизонтальных и вертикальных прямых, проведенных через одноименные точки деления, получают фронтальные проекции точек ( $0^1, 1^1, \dots, 12^1$ ) наматывания, которые соединяют плавной кривой. На развертке мотальной упаковки винтовая линия преобразуется в прямую, которая является гипотенузой прямоугольного треугольника, один катет которой будет

равен  $\pi D$ , а другой шагу намотки  $h$ . Угол между этими катетами соответствует половине угла скрещивания витков намотки  $\beta$ . Его называют углом подъёма витков, при  $\beta/2$ . Отметим, что фронтальная проекция винтовой линии (траектории движения точки наматывания) является синусоидой, которую описывает уравнение

$$x = \frac{D}{2} \sin \frac{2\pi}{h} y, \quad (2.52)$$

где  $x$  и  $y$  - координаты точки наматывания  $A$ .

Следует так же заметить, что винтовая линия, соединяющая две точки на цилиндрической поверхности, не лежащие на одной образующей, по кратчайшему расстоянию называют геодезическими линиями данной поверхности. Если нити намотки ложатся по геодезическим линиям, то намотка будет равновесной, т.к. ее витки будут устойчиво держаться на криволинейной поверхности цилиндрической паковки.

Очень важное значение, для исследования прочностных показателей структур 3D намоток, имеет построение фронтальной поверхности винтовых линий, рисунок 2.21, отражающих расположения нитей базовой и перевивочной структур на поверхности паковки. Точки пересечения этих кривых (синусоид) будут соответствовать местам «пересечек» (перекрытий) -  $t$  нитей в одном шаге намотки нитей, число которых характеризует коэффициент связности структуры 3D намотки. На рисунке 2.21 траектория движения точки  $A$  (синусоида изображена сплошной линией), показывает расположение на паковке нити базовой структуры, а траектория движения точки  $B$  (синусоида изображена штриховой линией) показывает расположение на паковке нити перевивочной структуры. Точки пересечения этих кривых (синусоид), указывают на места перевивки (закрепления) витков нитей разных систем в структуре 3D намотки. Если при формировании 3D намотки раскладчики нитей будут расположены напротив друг друга и двигаться асинхронно, то витки нитей перевивочной структуры (перемещение точки  $B$ ) будут смещены относительно витков намотки нитей базовой структуры (перемещение точки  $A$ ) на  $180^\circ$ , тогда на паковке будет формироваться не сомкнутая, а 2х замкнутая 3D намотка. Поэтому сдвиг витков (точек  $A$  и  $B$  должен быть равен  $\psi_c$  –

углу сдвига формирующего сомкнутую структуру намотки, в противном случае на паковке возникнут «жгуты» (брак структуры намотки). Очевидно, что после заполнения нитями первого условного объёмного слоя 3D намотки, произойдет приращение её диаметра на две нити и траектории витков нитей пойдут по синусоидам с увеличенной на два диаметра нити, с той же амплитудой. Построение всех винтовых линий (траекторий их движения) за время формирования одного объёмного слоя позволит, по числу «пересечек»  $t$ , определить степень связности структуры 3D намотки.

Следует отметить, что для построения разверток структур 3D намоток на плоскость удобно пользоваться и цилиндрической системой координат, которая приведена на Рисунке 2.22. В данной системе координат положение точек намотки нитей  $A$  и  $B$ , (их координаты в пространстве) можно определять в любой момент времени формирования паковки, заданием трех чисел  $r$ ;  $\varphi$ ;  $z$ :

$$\begin{aligned} r &= x \cos \alpha; \\ y &= r \sin \alpha; \\ z &= z, \end{aligned} \tag{2.53}$$

где  $r$  – радиус намотки;

$\alpha$  и  $\varphi$  – углы образованные радиусами (векторами) с осью  $ox$ ;

$z$  – аппликаты точки и  $B$ .

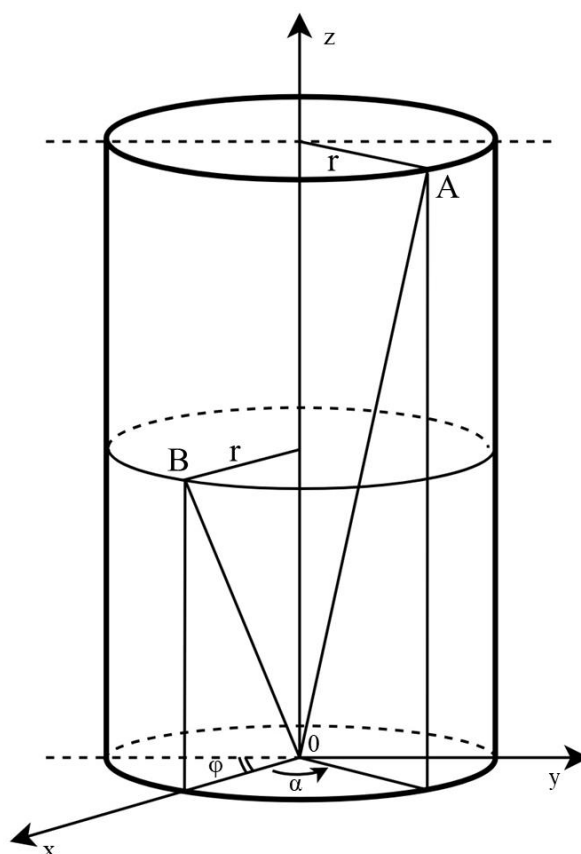


Рисунок 2.22 — Цилиндрическая система координат.

Следует отметить, что цилиндрическая система координат наглядно расширяет плоскую полярную систему, добавлением третьей линейной координаты, называемой «высотой», которая обозначается  $z$ . Это показывает объёмное трехмерное расположение витков катушки в ее структуре и упрощает процесс построения разверток на плоскость сложных (многосистемных) 3D катушек.

### **2.5.5. Анализ структур 3D намоток и параметров, влияющих на их прочностные характеристики**

Структуры 3D намоток еще мало изучены, а их большое многообразие требует выработки обобщающих подходов к анализу их свойств, прежде всего прочностных. Вполне очевидно, что такими параметрами являются, уже широко применяемые в текстильном материаловедении, показатели прочности текстильных полотен (тканей), а именно коэффициенты объёмного заполнения, жесткости и связанности структур

Расчёты коэффициентов объёмного заполнения 3D намоток всех видов следует проводить с учетом количества систем базовых и перевивочных нитей, их состава особенностей их структуры. Так, например, замкнутые намотки различной степени замыкания  $p$ , характеризуются ярко выраженной сотовой («ячеистой») пористой структур и использование в разных системах нитей с различными свойствами позволяет формировать сложные конструкционные материалы, с новыми свойствами. Кроме того, сохранение целостности (цилиндричности паковки и размеров пор) выбранной структуры, при использовании 3D замкнутых намоток, возможно только при условии использования в качестве нитей базовой и перевивочной структур различного сырьевого состава, имеющих одинаковую линейную плотность. При этом раскладчики нити, обеспечивающие перемещение базовых и перевивочных нитей должны работать строго синхронно, т.е. значения передаточного отношения от паковки к каждому раскладчику нити должны быть одинаковыми и постоянными в течение всего процесса формирования структуры 3D замкнутой намотки. В противном случае, будут наблюдаться нарушения структуры (смещение пор, изменение их размеров), а чаще всего происходит смятие пористой структуры, что делает её не пригодной для дальнейшего применения (например, в качестве композиционных фильтров). Однако

формирование структур 3D замкнутых намоток из нитей различной природы имеет большие перспективы, так как, использование нитей различного сырьевого состава, обладающих специфичными свойствами (например, биоцидными), позволяет создавать новые виды конструкционных материалов, со специфичными свойствами.

Геометрические параметры структур 3D намоток используются для определения прочностных показателей теоретическим путем, таких как, например, коэффициентов объёмного заполнения нитями различных систем, их изгиба, связности и жесткости структуры.

Для удобства и наглядности изучения структур, формируемых на базе 3D намоток, целесообразно рассматривать их развертки на плоскость.

На Рисунке 2.23 изображены развертки на плоскость: а) одно, б) двух и в) трех замкнутых намоток, рассмотрим их подробнее и введем новые определения.

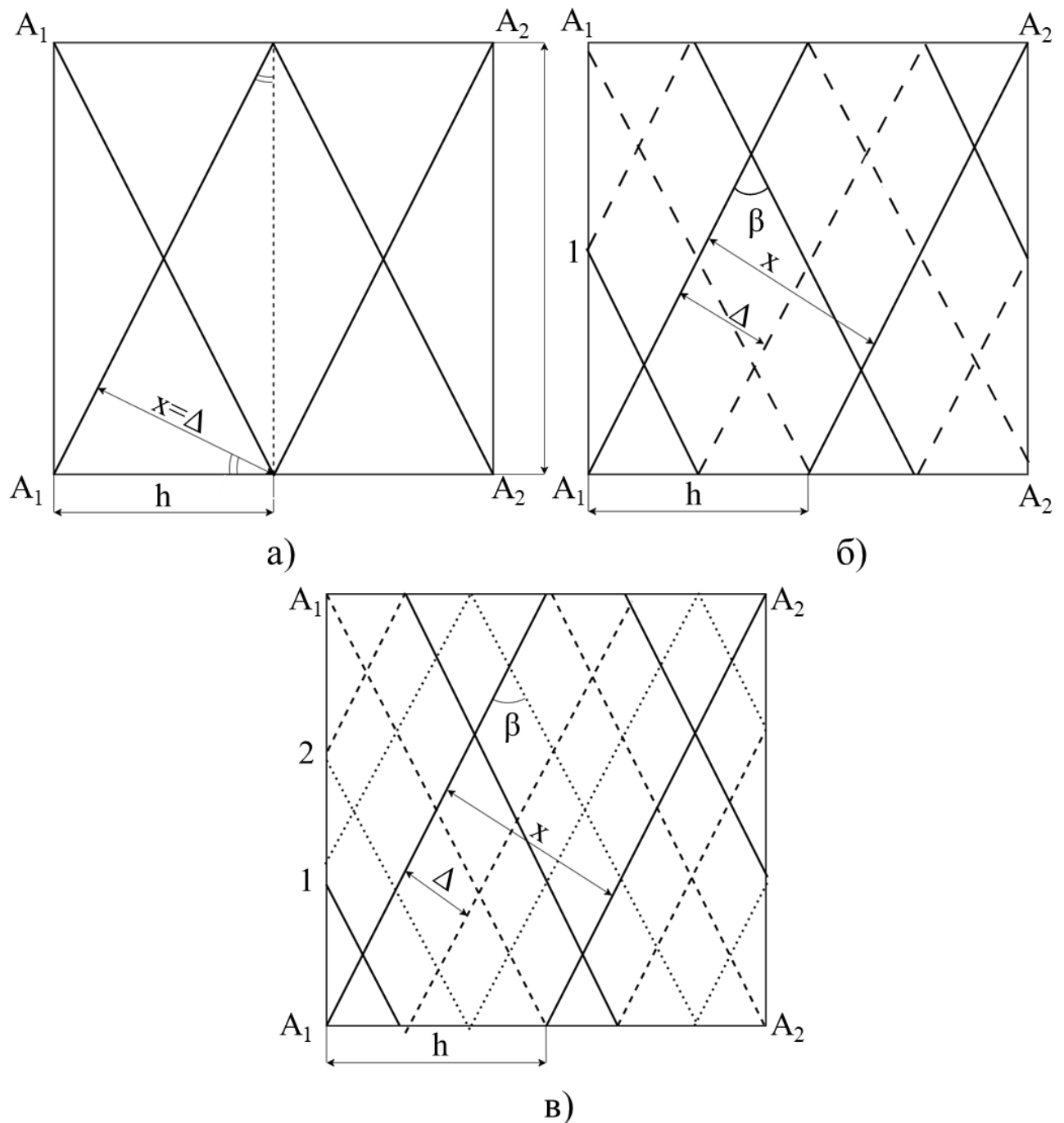


Рисунок 2.23 — Развертки а) одно, б) двух и в) трех замкнутых намоток.

На рисунках разверток сплошными линиями показаны витки первой пары слоев намотки, (или нити одной системы, например, нити базовой структуры). Штриховыми линиями показаны витки второй пары слоев намотки (или нити другой системы, например, перевивочные, раскладываемые другим раскладчиком нити). Штрихпунктирными линиями показаны витки третьей пары слоев намотки (или нити третьей системы), используемые в формировании структуры 3D намоток.

Для изучения структур 3D намотки необходимо ввести обозначения:

Раппорт 3D намотки - это наименьшее число нитей всех систем (базовых и перевивочных) в одном объёмном слое, участвующих в формировании структуры 3D намотки, после которого характер их расположения повторяется.

Следует различать: раппорт 3D намотки по углу сдвига витков и раппорт по ширине раскладки (как в тканых структурах различают раппорты по основе и по утку).

$R_\psi$  – раппорт 3D намотки по углу сдвига между витками различных пар слоев намотки нитей базовой и перевивочных структур - это минимальное число базовых и перевивочных нитей на длине образующей  $\pi D$  развертки намотки на плоскость, после которого намотка замыкается и характер расположения всех нитей начнет повторяться. При замкнутых 3D намотках витки нитей  $p+I^{oi}$  пары слоев пойдут по виткам первой пары, а при сомкнутых лягут рядом слева (при опережающей), или справа (при отстающей) от витков первой пары слоев. Очевидно, что данный раппорт характеризуется степенью замыкания намотки  $p$ .

$$R_\psi = W_6 + W_\pi, \quad (2.54)$$

где:

$W_6$  – число витков нитей базовой структуры в одном объёмном слое 3D намотки;

$W_\pi$  - число витков нитей перевивочных структур в одном объёмном слое 3D намотки.

$R_H$  - раппорт 3D намотки по ширине раскладки - это минимальное число базовых (и/или) перевивочных нитей на ширине раскладки  $H$ , после которого характер расположения всех нитей начнет повторяться. Следует различать так же, раппорт 3D намотки:

$$R_H = W_6 + W_\pi \quad (2.55)$$

Так как число систем нитей базовой и перевивочных структур, используемых в формировании 3D намотки, может быть несколько (больше 1), то введем определения:

$R_6$  - раппорт 3D структуры намотки базовых нитей - минимальное число базовых нитей на ширине раскладки  $H$ , после которого характер расположения витков базовой структуры повторяется;

$R_n$  - раппорт 3D структуры намотки перевивочных нитей - минимальное число перевивочных нитей на ширине раскладки  $H$ , после которого характер расположения витков перевивочной структуры повторяется;

Очевидно, что

$$R_n = R_6 + R_n \quad (2.56)$$

$R_{6\psi}$  - раппорт намотки по углу сдвига витков базовых нитей – минимальное число базовых нитей на длине развертки одного объёмного слоя  $\pi D$  после которого базовая намотка замкнется и характер расположения витков базовой структуры будет повторяться.

$R_{n\psi}$  - раппорт 3D намотки по углу сдвига витков перевивочных нитей - минимальное число перевивочных нитей на длине развертки одного объёмного слоя  $\pi D$ , после которого намотка перевивочных нитей замкнется и характер расположения витков нитей перевивочной структуры будет повторяться.

В общем случае, значения раппортов 3D намотки  $R_{6\psi}$  и  $R_{n\psi}$  - характеризуются углом сдвига между виткам  $\psi_{1,p+1}$  различных пар слоев намотки, или степенью замыкания намотки  $p$  – минимальным числом двойных ходов раскладчика нити, по истечение которого витки  $p+1^{ой}$  пары (базовых или перевивочной структуры) слоев намотки, лягут на витки  $1^{ой}$  пары слоев (при замкнутой намотке), или лягут рядом в витками первой пары слоев (при сомкнутой структуре 3D намотки);

$S$  - сдвиг витков 3D намотки - смещение мест пересечения базовых и перевивочных нитей в смежных слоях структуры 3D намоток

$$s = \pi D \operatorname{ctg} \beta/2, \quad (2.57)$$

где  $D$  – текущий диаметр намотки мотальной паковки.

Следует отметить, что места пересечения нитей в смежных слоях структуры 3D намоток смещаются относительно друг друга размеренно (пропорционально) углу поворота паковки на угол  $\varphi$ .

$x$  – кратчайшее расстояние между осевыми линиями витков 3D намотки базовых нитей, в шаге одного слоя намотки  $h$  (см);

При сомкнутой структуре 3D намоток, промежутки  $x$  между осевыми линиями витков нитей базовой структуры, будет полностью заполнен нитями базовой и перевивочных структур;

$N = 2; 3 \dots$  число систем нитей (базовых и перевивочных), используемых в формируемой структуре 3D намотки (числа натурального ряда);

$h = \frac{H}{2P}$  - шаг витков нитей базовой и перевивочной структур в раппорте 3D намотки, или перемещение нитераскладчиков, формирующих базовую и перевивочную структуры, из одного крайнего положения в противоположное (слева направо, или наоборот) (см);

$h_b$  - шаг витков нитей, формирующих базовую структуру 3D намотки (перемещение раскладчика нити с базовой нитью слева направо, или наоборот) (см);

$h_n$  - шаг витков нитей, формирующих перевивочную структуру 3D намотки, (перемещение раскладчика нити с перевивочной нитью слева направо, или наоборот) (см);

$d_\sigma$  – условный диаметр нити базовой структуры;

$d_n$  - условный диаметр нити перевивочной структуры;

$t$  – «пересечка» - место изгиба нитей в местах их перекрещивания, т.е. переход из нижнего слоя намотки в верхний, и наоборот;

$W$  – общее число витков нитей базовой и перевивочных структур в одном объёмном слое 3D намотки.

$n$  – полное число оборотов мотальной паковки за цикл движения раскладчиков нитей при формировании одного объёмного слоя 3D намотки.

Из Рисунка 2.23 а), б) и в) видно, что для замкнутых 3D намоток число витков каждой структуры (базовой и перевивочных) в шаге в шаге намотки  $h$  точно равно степени её замыкания  $p$ . Если расстояния между витками принять равными расстоянию между осевыми линиями витков, то можно записать:

$$\Delta = \frac{x}{p} = \frac{h \cos \beta/2}{p} = \frac{\pi D \tan \frac{\beta}{2} \cos \beta/2}{p} = \frac{\pi D \sin \beta/2}{p} \quad (2.58)$$

Поскольку на прецизионных мотальных машинах  $\pi D \sin \frac{\beta}{2} = \text{const}$ , то при возрастании  $p$  расстояние  $\Delta$  будет уменьшаться. Теоретически можно подобрать такое передаточное отношение  $i_o$  и такую  $p$ , что  $\Delta$  станут равны диаметрам нитей  $d$ , а замкнутая намотка будет сомкнутой, в этом случае:

$$d = \frac{\pi D \sin \beta/2}{p}, \text{ откуда } p = \frac{\pi D \sin \beta/2}{d} \quad (2.59)$$

Для таких намоток очевидно, что:

$$P_3 = P_z = P_c \quad (2.60)$$

Однако это частный случай. Возникающий при  $p$  стремящейся к очень большому целому числу. Обычные сомкнутые намотки формируются при  $p = 1; 2; 3$  и для них  $p_c \gg p_z$ .

Покажем это на конкретном примере. Посчитаем приблизительно стерень замыкания намотки  $p$  для «сомкнуто-замкнутой» намотки.

Пусть  $D = 90$  мм;  $\beta/2 = 12^\circ$ ;  $d = 0,2$  мм.

$$\text{Тогда } p_c = p_z = \frac{\pi 90 \sin \beta/2}{0,2} = 294.$$

Вполне очевидно, что такие сомкнутые намотки возможны только при очень большом значении диаметра намотки, ибо после 294 двойных ходов раскладчиков

нитей, витки первых пар 3D намотки будут замотаны витками предыдущих слоев и виткам 295<sup>й</sup> пары слоев нитей не удастся лечь рядом с витками первой пары слоев.

Для  $p$  - замкнутых 3D намоток вырабатываемых из 2-х систем нитей (при  $N = 2$ ), общее число витков нитей базовой и перевивочных структур в раппорте 3D намотки:

$$W = W_6 + W_n = n \times N, \quad (2.61)$$

Смотри рисунок 2.23 а), где изображена развертка однозамкнутой намотки, где  $p = 1$  и  $N = 2$ ;  $n = 2$  (оборота).

$$W = n \times N = 2 \times 2 = 4 \text{ (витка);}$$

На рисунке 2.23 б), изображена развертка двухзамкнутой намотки, где  $p = 2$  и  $N = 2$ ;  $n = 3 \frac{1}{2}$  (оборота).

$$W = n \times N = 3 \frac{1}{2} \times 2 = 7 \text{ (витков).}$$

Для  $p$ -замкнутых 3D намоток вырабатываемых из 3х систем нитей.

На рисунке 2.23. в) изображена развертка трехзамкнутой 3D намотки,

При  $p = 3$  и  $N = 3$ . общее число витков нитей базовой и перевивочных структур в раппорте 3D намотки:

$$W = n \times N = 3 \frac{1}{3} \times 3 = 10 \text{ (витков).}$$

Число пересечений (перевивочных связей) базовых нитей с перевивочными в пределах раппорта хорошо видно из Рисунка 2.20, где изображены: а) схема раппорта 3D намотки двух систем нитей с чередованием нитей базовой и перевивочной структур 2/1 (по типу тканого переплетения саржа 2/1) и б) схема поперечного намотки разрез с указанием мест «пересечек» нитей  $t$ .

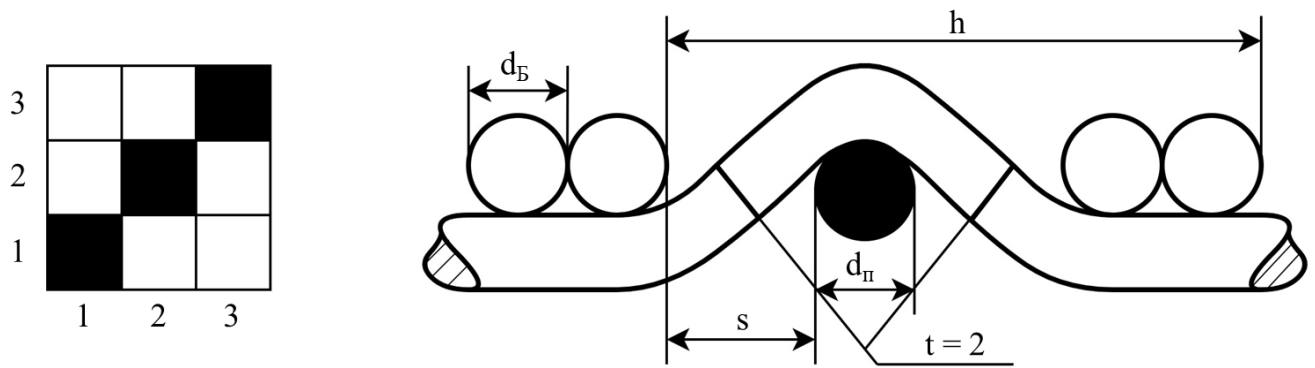


Рисунок 2.24 — а) Схема раппорта 3D намотки двух систем нитей с чередованием нитей базовой и перевивочной структур 2/1 и б) поперечный разрез намотки.

Из рисунка видно, что число «пересечек» нитей  $t$  равно двум на каждом из пересечений витков нитей разных структур.

$X_6$  — число пересечений (перевивочных связей) базовых нитей с перевивочными в пределах раппорта;

$X_{\Pi}$  — число пересечений (связей перевивочных нитей с базовыми) в пределах всего раппорта.

Рассмотрение Рисунка 2.2. и анализ разверток намоток на плоскость, показывает, что в общем случае, для  $p$ -замкнутых 3D намоток вырабатываемых из  $2x$  и более систем нитей (при  $N=2$  и более), общее число пересечений нитей базовой и перевивочных структур в раппорте 3D намотки определяется по формуле:

$$X_{\text{общ}} = W \times N + N = N (W + 1) \quad (2.62)$$

Так например, при однозамкнутой намотке рисунок 2.8 а), где  $p=1$  и  $N=2$ ;  $W=4$  (оборота).

$X_{\text{общ}} = 2 \cdot (4+1) = 10$  (перекрещиваний нитей), при этом число «пересечек» нитей в пределах раппорта намотки составит:

$$t = 2 X_{\text{общ}} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ (пересечек)} \quad (2.63)$$

Для двухзамкнутой 3D намотки из 2х систем нитей (при  $N=2$ ), Рисунок 2.20 б), общее число пересечений нитей базовой и перевивочных структур в раппорте 3D намотки:

$$X_{\text{общ}} = N (W + 1) = 2(7 + 1) = 16 \text{ (перекрещиваний нитей)} \quad (2.64)$$

Число «пересечек» нитей в пределах раппорта намотки:

$$t = 2 X_{\text{общ}} = 2 \times 16 = 32 \text{ (пересечки)} \quad (2.65)$$

Для  $p$ -замкнутой 3D намоток (Рисунок 2.20 в), вырабатываемых из 3х систем нитей общее число пересечений нитей базовой и перевивочных структур в раппорте 3D намотки, при  $p = 3$  и  $N = 3$ :

$$X_{\text{общ}} = N = N (W + 1) = 3(10 + 1) = 33 \text{ (перекрещивания нитей).}$$

Общее число «пересечек» нитей в пределах раппорта намотки:

$$t = t_{\text{б}} + t_{\text{п}} = 2 X_{\text{общ}} = 2 \times 33 = 66 \text{ (пересечек),}$$

где  $t$  общее число «пересечек» нитей в раппорте 3D намотки; базовых и перевивочных; равно удвоенному значению общего числа витков;

$t_{\text{б}}$  – число пересечек базовых нитей в пределах раппорта;

$t_{\text{п}}$  - число пересечек перевивочных нитей в пределах раппорта;

$h_{\text{б}} = 2H/k$  – шаг витков базовых нитей в раппорте намотки;

$h_{\text{б}}$  - шаг витков перевивочных нитей в раппорте намотки;

$H$  – размах раскладчика нити (высота паковки), (см);

$k$  – число оборотов кулачка раскладчика нити за цикл движения нити (определяется конструкцией механизма раскладки нити);

$n$  – полное число оборотов паковки за цикл движения раскладчика нити (раскладчиков нитей, перемещающих нити разных систем 3D намотки);

$n_1$  – целая часть числа  $n$ ;

$k_3$  – коэффициент заполнения 3D намотки;

$K_n$  - коэффициент жесткости (переплетения) 3D намотки.

$C$  - коэффициент связности 3D намотки.

Из представленных рисунков 2.23 так же видно, что у однозамкнутой намотки а), после цикла движения раскладчиков нитей базовой и перевивочной нитей (одного двойного хода раскладчиков нитей), точки наматывания двух систем нитей, выходя соответственно из точек  $A_1$  и  $A_2$ , вернулась в исходные точки, при этом паковка сделала целое число оборотов (четыре оборота). В этом случае углы сдвига между витками первой и второй парами слоев намотки каждой структуры намотки составили:

$$\psi_{1,2} = 2\pi (n - n_1) = 0. \quad (2.66)$$

У двухзамкнутой намотки Рисунок 2.23 б) после цикла движения раскладчиков нитей (перемещающих нити базовой и перевивочной структур, соответственно из точек  $A_1$  и  $A_2$  не пришли в исходное положение, а встретились в точке 1, где намотка замкнулась. В этом случае за цикл движения раскладчиков нитей паковка сделала дробное число оборотов ( $3$  и  $1/2$  оборота), а углы сдвига витков каждой структуры составили:

$$\psi_{1,2} = 2\pi (3 \cdot \frac{1}{2} - 3) = \pi. \quad (2.67)$$

За следующий цикл движения раскладчиков нитей паковка снова совершила  $3 \cdot \frac{1}{2}$  оборота и углы сдвига между витками второй и третьей парами слоев намотки составили:

$$\psi_{2,3} = 2\pi (3 \cdot \frac{1}{2} - 3) = \pi \quad (2.68)$$

Далее, углы сдвига между витками первых и третьих парами слоев намотки составили:

$$\psi_{1,3} = \psi_{1,2} + \psi_{2,3} = \pi + \pi = 2\pi \quad (2.69)$$

Таким образом, витки третьих пар слоев намотки (витки обеих систем нитей) пойдут по виткам первых пар слоев и намотка замыкается.

У трехзамкнутой 3D намотки Рисунок 2.23 в) после первого цикла движения раскладчиков нитей точки наматывания трех систем нитей тоже приходят не в начальное положение, а в точки 1 и 2. За каждый цикл движения каждого из трех раскладчиков нитей паковка делает  $3 \text{ и } 1/3$  оборота, а угол сдвига между витками каждой структуры составит:

$$\psi_{1,2} = 2\pi \left(3 \frac{1}{3} - 3\right) = 2\pi/3 \quad (2.70)$$

Очевидно, что  $\psi_{2,3} = \psi_{1,2} = \psi_{1,3} = 2\pi/3$

Аналогично, как и в предыдущем случае, углы сдвига витков у каждой из систем составят:

$$\psi_{1,4} = \psi_{1,2} + \psi_{2,3} + \psi_{3,4} = 2\pi \quad (2.71)$$

Витки четвертых пар слоев намотки пойдут по виткам первых пар слоев и намотка замкнется.

В общем случае для  $p$  – замкнутых 3D намоток:

$$\psi_{1,2} = \psi_{2,3} = \dots = \psi_{n,n+1} = \frac{2\pi}{p}, \quad (2.72)$$

а углы сдвига между витками первых и  $p+1^{\text{ый}}$  пар слоев витков намотки определится выражением:

$$\psi_{1,p+1} = 2\pi p (n - n_1), \quad (2.73)$$

где  $p$  – степень замыкания намотки;

3D намотка называется  $p$  – замкнутой, потому, что после  $p$  двойных ходов раскладчиков нитей замыкаются винтовые линии, образуемые витками на поверхности намотки и начинается формирование новых объёмных слоев, то есть диаметр намотки паковки после  $p + 1$  циклов движения раскладчиков нитей возрастет на два диаметра базовых и два диаметра перевивочных нитей (с учетом смятия нитей в местах пересечения).

### 2.5.6. Расчет коэффициентов заполнения объема 3D намотки нитями базовой и перевивочных структур

Для определения коэффициентов заполнения структуры 3D намотки нитями базовой и перевивочных систем (рассматривая развертки), проведем следующие расчеты отдельно для нитей базовой и перевивочных структур по следующей последовательности:

1. Определяем число витков намотки нитей различных систем в одном раппорте 3D намотки по формуле:

$$W = k \times i_o \times \frac{x}{2b}, \quad (2.74)$$

где  $2b$  - большая ось эллипса нити в намотке (с учетом ее смятия в местах пересечения) под натяжением и прессующей нагрузкой укатывающего ролика;

$i_o$  - общее передаточной отношение от каждого из раскладчиков нитей к паковке, используемых для раскладки нитей данной системы;

$k$  - число оборотов пазового кулачка раскладчика нити за цикл движения нити;

$x$  - минимальное расстояние между витками базовой системы нитей в шаге одного слоя намотки;

$$x = h \times \cos \frac{\beta}{2}, \quad (2.75)$$

где  $h = \frac{2H}{k}$  - шаг намотки (см);

$H$  - высота намотки формируемой паковки.(см);

Следовательно:

$$W = \frac{k \times i_o \times \frac{2H}{k} \times \cos \frac{\beta}{2}}{i_o \times 2b} = \frac{H \times \cos \frac{\beta}{2}}{b} \quad (2.76)$$

2. Суммарная длина всех витков рассматриваемой системы нитей (например, базовых) в одном объемном слое:

$$L = l \times W = \frac{\pi D}{\cos \frac{\beta}{2}} W = \frac{\pi D H \cos \frac{\beta}{2}}{b \cos \frac{\beta}{2}} = \frac{\pi D H}{b}, \quad (2.77)$$

где  $l$  - длина одного витка намотки нити рассматриваемой системы.

3. Определяем массу нитей рассматриваемой системы в пределах одного объемного слоя намотки (г):

$$G = \frac{L}{N} = \frac{\pi D H}{b N}, \quad (2.78)$$

где  $T$  - линейная плотность нити рассматриваемой системы (текс), или ( $N$ -номер нити (м/г)).

4. Определяем объем, занимаемый слоем намотки, который составит (см<sup>3</sup>):

$$V = \pi D H \delta, \quad (2.79)$$

где  $\delta$  - толщина объемного слоя нитей (с учетом смятия нитей).

Очевидно, что  $\delta = 4a$ , где  $a$  - малая ось эллипса в сечении нити рассматриваемой системы.

$$V = \pi D H 4a \quad (2.80)$$

5. Определяем удельную плотность намотки нити рассматриваемой системы по формуле:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{\pi D H}{b N \pi D H 4a} = \frac{1}{4abN} \quad (2.81)$$

6. Определяем коэффициент заполнения намотки нитями рассматриваемой системы из выражения [60],:

$$\gamma = k_z \gamma_n,$$

следовательно:

$$k_z = \gamma / \gamma_n, \quad (2.82)$$

где  $\gamma_n$  - плотность наматываемой нити.

7. Проведя отдельные расчеты коэффициентов заполнения объема 3D намотки нитями базовой и перевивочной структур, определяем суммарный коэффициент заполнения формируемой армирующей структуры КМ наполнителем:

$$k_{3D} = k_{3б} + k_{3п}, \quad (2.83)$$

где  $k_{3б}$  – коэффициент заполнения объема 3D намотки нитями базовой системы;

$k_{3п}$  – коэффициент заполнения объема 3D намотки перевивочными нитями.

Приведенные расчеты показывают, что суммарный коэффициент заполнения формируемой структуры 3D намотки нитями базовой и перевивочной структур  $k_{3D}$  напрямую зависит от числа витков нитей  $W$  каждой структуры в пределах раппорта намотки и степени замыкания намотки  $p$ . Чем больше нитей укладывается в раппорте намотки и выше степень их замыкания, тем больше будет заполнение армирующей структуры наполнителями – нитями различных систем (базовой и перевивочных структур).

Проведенные практические исследования структур  $p$ –замкнутых 3D намоток, показывают, что фактическое значение их удельной плотности намотки превышает расчетные значения, что обусловлено несколькими факторами, влияющими на взаимное расположение нитей в структуре намотки. Это может быть избыточное натяжение нитей и искажение формы поперечника (неравноота нитей) наматываемых нитей, и степень прессования намотки укатывающими роликами (если они применяются), но главное влияние оказывает величина степени замыкания намотки  $p$ ,

Следовательно, в случае формирования сомкнутых 3D намоток, независимо от вида волокнистого состава нитей, коэффициент заполнения их объема паковки волокнистым материалом будет приближаться к максимально возможному значению, равному:

$$k_3 = \frac{\pi}{4} = 0,785$$

Таким образом, заполнение  $p$ -замкнутых 3D намоток может варьироваться, как по сырьевому составу наполнителей, так и по их долевному содержанию в широких пределах, причем определяемому расчетным путем, что открывает широкие возможности разработки конструкционных композиционных материалов нового вида.

**Пример.** Пусть необходимо:

1) Сформировать 3D намоткой сомкнутой структуры армирующую заготовку КМ из двух систем углеродных «площеных» нитей различной линейной плотности: а) базовых, с линейной плотностью  $T_6 = 800$  текс, и б) перевивочных, с линейной плотностью  $T_{\Pi} = 320$  текс.

2) Структура 3D намотки должна формироваться с чередованием двух базовых и одной перевивочной нити (по типу многослойной ткани с рисунком переплетения саржа 2/1) Рисунок 2.19. а).

3) Размеры заготовки: Высота - паковки  $H = 150$  мм; Диаметр оправки  $D = 100$  мм; Толщина намотки  $S = 25$  мм.

4) Определить коэффициенты объёмного заполнения заготовки каждой системой нитей, а так же коэффициенты жесткости и связности формируемой 3D структуры.

Для решения поставленной задачи принимаем: два вида «площеных» углеродных нитей 12К линейной плотностью 800 текс и 3К, линейной плотностью 320 текс, с шириной поперечников, соответственно:  $d_6 = 2,5$  мм и  $d_{\Pi} = 1$  мм, при толщине поперечников нитей равной:  $s_6 = s_{\Pi} = 0.01$  мм.

Схема разрабатываемой структуры 3D намотки показана на рисунке 2.19.

**Решение поставленной задачи.**

1. Определим число витков нитей базовых перевивочных структур, в раппорте намотки с учетом заданного их чередования 2/1. При сомкнутой

структуре намотки высота паковки  $H$  должна вмещать целое число раппортов структуры с заданным чередованием, то есть:

$$W = \frac{H}{(d_6 + d_6 + d_{\Pi})} = \frac{150}{(2,5 + 2,5 + 1)} = 25 \text{ (витков)}, \text{ заданным с чередованием, причем,}$$

из общего числа 20 витков базовой структуры и 5 витков перевивочной структуры точно укладывается в раппорте намотки целое число раз. Следовательно, в одном объёмном слое намотки число витков нитей будет удвоено, и, соответственно число витков будет равно:

$$W_6 = 40, \text{ а } W_{\Pi} = 10, W = 50 \text{ витков.}$$

2. Длина нитей в объёмном слое 3D намотки:

$$L = \frac{\pi D}{\cos \beta / 2} W \text{ (м).}$$

а) Длина нитей базовой структуры; б) длина нитей перевивочной. структуры;

$$L_6 = \frac{\pi D}{\cos \beta / 2} W_6;$$

$$L_{\Pi} = \frac{\pi D}{\cos \beta / 2} W_{\Pi}$$

$$L_6 = \frac{3.14 \times 100}{0,7} 40 = 17,94 \text{ (м); } L_{\Pi} = \frac{3.14 \times 100}{0,7} 10 = 4,48 \text{ (м).}$$

3. Масса нитей в объёмном слое 3D намотки:

$$G = \frac{L}{N} \text{ (г)}, \text{ соответственно: } (N = \frac{1000}{T})$$

а) Масса нитей базовой структуры; б) масса нитей перевивочной. структуры

$$G_6 = \frac{17,97}{1,25} = 14,37 \text{ (г); } G_{\Pi} = \frac{4,48}{1,254} = 1,44 \text{ (г);}$$

4. Объём одного слоя намотки (см<sup>3</sup>):

$$V = \frac{\pi D H}{\cos \beta / 2} \delta = 13.45 \text{ (см}^3\text{)},$$

где  $\delta = s_6 + s_{\Pi} = 0.02 \text{ (см)}$  - толщина базовой и перевивочной нити.

5. Удельная плотность намотки:

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ (г/см}^3\text{):}$$

а) нитей базовой структуры; б) нитей перевивочной. структуры:

$$\gamma_6 = \frac{14,37}{13,45} = 1,068 \text{ (г/см}^3\text{);} \quad \gamma_{\Pi} = \frac{1,44}{13,45} = 0,1 \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

6. Коэффициент заполнения объёма:

$$k_3 = \gamma / \gamma_{\Pi},$$

а) нитей базовой структуры; б) нитей перевивочной. структуры:

$$k_{36} = \frac{6}{\Pi} = \frac{1,068}{1,75} = 0,61 \quad k_{3\Pi} = \frac{0,1}{1,75} = 0,057 .$$

7. Коэффициент заполнения объёма 3D намотки нитями 2-х систем:

$$k_{3.3D} = k_{36} + k_{3\Pi} = 0,61 + 0,057 = 0,662.$$

На основании сделанных расчетов можно сделать заключение о том, что полученное значение коэффициента объёмного заполнения 3D намотки сомкнутой структуры, не достигает максимально возможного значения (0.785), что обусловлено сделанными допущениями при определении размеров поперечников используемых нитей. Однако оно подтверждает проведенные ранее теоретические исследования и свидетельствует о возможности проектировать новые конструкционные материалы на базе 3D намоток, с требуемым долевым содержанием наполнителей разной природы.

Для получения заготовки заданной толщины намотки  $S=25$  мм, при толщине плетеных нитей  $s_6 = s_{\Pi} = 0.01$  мм, необходимо намотать на оправку 1250 объёмных слоев намотки.

### 2.5.7. Расчет коэффициента жесткости 3D намотки

Для удобства расчетов прочностных характеристик 3D намоток рассмотрим рисунок 2.25, на котором изображена развертка 3D трех замкнутой намотки, где первую пару слоев намотки раскладывает 1<sup>й</sup> раскладчик нити, вторую пару слоев раскладывает 2<sup>й</sup> раскладчик нити, и третью пару слоев раскладывает 3<sup>й</sup>. В данном случае раппорты базовых и двух перевивочных систем нитей укладываются на всей площади развертки.

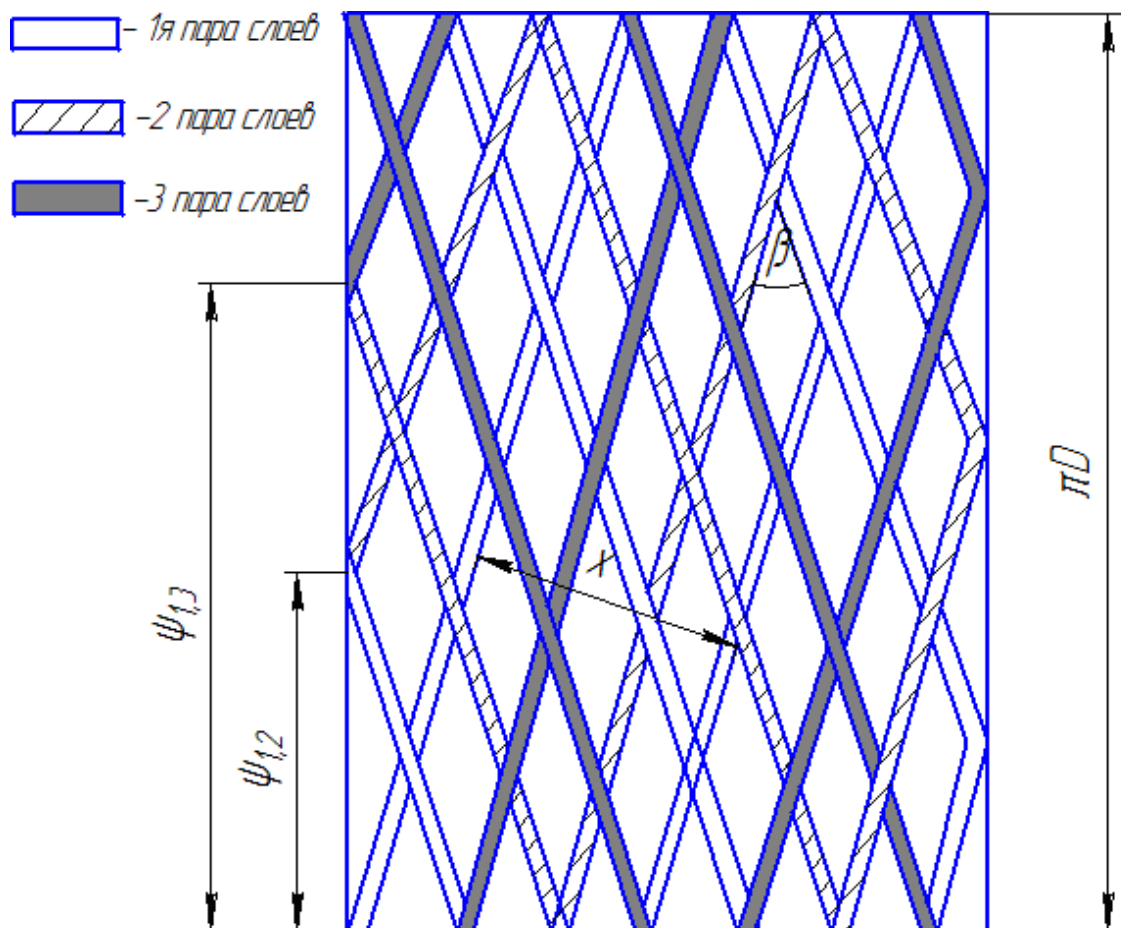


Рисунок 2.25 — Развертка раппорта 3D трех замкнутой структуры намотки.

При условии равенства линейных плотностей всех используемых нитей на развертке представлен один раппорт 3D трех замкнутой намотки, который наглядно демонстрирует места перекрещивания витков всех трех систем между собой и «пересечки» нитей каждой системы со своими и нитями двух других систем.

**Коэффициент жесткости (переплетения) 3D намотки** определяет степень жесткости перевивочных связей между нитями, используемыми при формировании её структуры, он определяется выражением:

$$K_n = \frac{X_6 X_{\Pi}}{t} \quad (2.84)$$

Как видим, коэффициент жесткости (переплетения) 3D намотки зависит от числа «пересечек»  $t$  (изгибов) нитей в раппорте намотки. Следует отметить, что «пересечка» показывает глубину изгиба нитей в структуре 3D намотки, а, следовательно, она влияет на прочностные характеристики самих нитей и изменения напряжений волокон, возникающих при этом. Однако, несмотря на то, что непрерывные базовые и перевивочные нити проходят через всю толщу намотки, в отличие от тканых структур, величина их изгибов невелика, а изменяется плавно и не превышает высоту диаметра нити противоположной системы. Это положительно сказывается на прочностных характеристиках всей структуры 3D намотки.

**Пример.** Определим коэффициент жесткости (переплетения) 3D однозамкнутой намотки, изображенной на Рисунок 2.23 а), из которого видно, что каждый из двух раскладчиков нитей за цикл своего движения разложит по четыре витка нитями своей системы, т.е. полное число витков в раппорте намотки составит;  $X_{\text{общ}} = N (W + 1) = 10$  (перекрещиваний нитей), при этом число «пересечек» нитей в пределах раппорта намотки  $t = 2 X_{\text{общ}} = 2 \times 10 = 20$  (пересечек).

Тогда коэффициент жесткости рассматриваемой 3D намотки составит:

$$K_n = \frac{X_6 X_{\Pi}}{t} = \frac{44}{20} = 0,8 \quad (2.85)$$

Низкое значение коэффициента жесткости рассматриваемой намотки обусловлено низкой степенью замыкания намотки  $p$  и, следовательно, малым числом витков нитей базовой и перевивочных систем в раппорте рассматриваемой 3D намотки.

### 2.5.8. Расчет коэффициента связности 3D намотки

Коэффициент связности 3D намоток характеризует прочность формируемой структуры, степень скрепления намотки связями перевивающихся (перекрещивающихся) между собой витков нитей всех используемых систем, (как перекрещивающихся между собой, так и между нитями противоположных систем). Количество перевивочных систем нитей (в зависимости от их сырьевого состава) вводятся в структуру 3D намоток с целями:

- увеличения перевивочных связей между витками различных систем в смежных слоях намотки, для повышения прочности структуры (устойчивости к сдвигу слоев намотки при внешнем воздействии на них), для этого, чаще всего, целесообразно использовать перевивочные нити малой линейной плотности (но кратной), по отношению к линейной плотности нитей базовой структуры;
- увеличения направлений расположения волокон в армирующей структуре, что особенно важно для создания углерод-углеродных теплозащитных материалов;
- создания композиционных материалов со специфичными свойствами, за счет использования нитей (в заданных долях от общего объема композита) различного сырьевого состава, (например, фрикционных материалов для тормозных дисков из углеродных и кремнеземных нитей).

Коэффициент связности 3D намотки определяется из отношения:

$$C = \frac{R_6 \times R_{\Pi} \times T_{\text{ср}}}{1000 \times F}, \quad (2.86)$$

где

$R_6$  – плотность базовых нитей в пределах раппорта намотки, (н/см);

$R_{\Pi}$  - плотность перевивочных нитей в пределах раппорта намотки, (н/см);

$F$  – коэффициент переплетения базовых и перевивочных нитей, (с учетом заданного чередования), например, по типу тканых переплетений саржа 2/1, и определяется выражением:

$$F = \frac{2R_6 \times R_{\Pi}}{t}, \quad (2.87)$$

где

$R_6$  и  $R_{\Pi}$  – соответственно, раппорты заданного чередования нитей базовой и перевивочной структур, а  $t$  – число «пересечек» нитей в пределах раппорта 3D намотки.

Так, для чередования типа саржа 2/1,  $R_6 = R_{\Pi} = 3$ , а  $t = 6$ .

$T_{\text{ср}}$  - средняя линейная плотность нитей базовой и перевивочной структур, (текс).

$$T_{\text{ср}} = 2 T_6 T_{\Pi} / T_6 + T_{\Pi} \quad (2.88).$$

**Пример.** Необходимо сформировать армирующую заготовку плоской прямоугольной формы с размерами:  $H = 150$  мм;  $L = 314$  мм намоткой 3D **сомкнутой** структуры из плоских (12К и 3К углеродных нитей, линейной плотности, соответственно, 800 и 320 текс), с чередованием 2/1 (две нити базовой и одна перевивочной структур). Ширина плоских нитей базовой структуры составляет  $d_6 = 2,5$  мм; а перевивочной  $d_{\Pi} = 1$  мм. и определить коэффициент связности проектируемой намотки.

**Решение.**

Для получения плоской пластины из углеродных нитей требуемой структуры (с заданным чередованием нитей базовой и перевивочной структур), сформируем мотальную паковку 3D намоткой, которую развернем на плоскости. Для этого:

1. Определим плотность сомкнутой намотки нитей базовой и перевивочной структур. Очевидно (Рисунок 2.19. а), что при заданном чередовании нитей 2/1 в одном объёмном слое намотки (шириной паковки  $H=150\text{мм}$ ) уложится целое число раппортов 2/1, с шагом намотки  $h = h_{\delta} = h_{\pi} = 2,5 + 2,5 + 1 = 6\text{ мм}$  (Рисунок 2.21 а), а на паковке уложится целое число раппортов  $R = R_{\delta} = R_{\pi} = 3$  нитей с заданным чередованием 2/1. Число раппортов:  $K = H/h = .15/6 = 25$ .

Тогда, при сомкнутой 3D намотке плотность базовых нитей составит:

$$P_{\delta} = \frac{10W}{H} = \frac{10 \times 40}{15} = 33,3 \text{ (н/10см)}.$$

Плотность перевивочных нитей

$$P_{\pi} = \frac{10 \times W}{\pi D} = \frac{10 \times 52,3}{31,4} = 16,6 \text{ (н/10см)}.$$

2. Средняя линейная плотность нитей базовой и перевивочной структур,  $T_{\text{ср}}$  (текс):

$$T_{\text{ср}} = 2 T_{\delta} T_{\pi} / T_{\delta} + T_{\pi} = \frac{2 \times 800 \times 320}{800 + 320} = 457 \text{ (текс)}.$$

3. Определим коэффициент переплетения намотки

$$F = \frac{2R_{\delta} \times R_{\pi}}{t} = \frac{2 \times 3 + 3}{6} = 3.$$

4. Тогда коэффициент связности проектируемой 3D сомкнутой намотки составит:

$$C = \frac{33,3 \times 16,6 \times 457}{1000 \times 3} = 7.59$$

Решение показало, что коэффициент связности проектируемой структуры 3D намотки высок и сопоставим с аналогичными параметрами многослойных тканых структур, у которых «С» изменяется от 2 до 8,5. Это свидетельствует так же о возможности формирования 3D намоткой структур высокой связанности и прочности к сдвигу и расслоению намоток при воздействии на них больших внешних нагрузок.

## Выводы по главе 2

1. Исследования, проведенные во второй главе, показывают, что главным параметром, определяющим все виды структур намоток мотальных паковок, является угол сдвига витков  $\psi_{1,P+1}$ . Это угол смещения витков нитей, образующийся на торце мотальных паковок между различными парами слоёв намотки.

2. В зависимости от величины угла сдвига витков, структуры намоток мотальных паковок, подразделяются на три основные группы: сомкнутые, замкнутые, спиралевидные и их производные, которые возможно применять в качестве армирующих структур композиционных материалов различного назначения.

3. Сомкнутые намотки и их производные, обладают максимально-возможной, (по сравнению со всеми иными структурами наполнителей композитов) удельной плотностью намотки (материалоемкостью), причем, постоянной, как в осевом, так и в радиальном направлениях паковки.

4. Структуры сомкнутых намоток отличаются друг от друга по степени замыкания намотки- $p$  и взаимному расположению витков намотки при их формировании, делятся на «опережающие» и «отстающие», данные особенности структур сомкнутых намоток приобретают особое значение при формировании наполнителей (армирующих заготовок) композиционных материалов, которые будут подвергаться большим внешним нагрузкам, действующим по известным направлениям.

5. Натяжение нити и степень присвоения намотки, при формировании мотальных паковок сомкнутой структуры, незначительно влияют на удельную плотность формируемых паковок.

6. Замкнутые намотки являются базовыми для всех остальных видов структур намоток, они имеют пористую (ячеистую) структуру, размеры пор могут задаваться расчетным путем, что может быть использовано в инжиниринге композитных материалов, при выборе соотношения долей армирующего текстильного материала (намотки заданной степени замыкания –  $p$ ) и связующего.

7. Структуры спиралевидных намоток нитей на оправки отличается тем, что у «опережающих» намоток поры, (точки пересечения витков), смещаются на заданную величину в каждом последующем слое относительно предыдущего по ходу часовой стрелки, а, у «отстающих», наоборот, против хода часовой стрелки.

8. Разработана технология процесса формирования многослойных прецизионных структур 3D намоток мотальных паковок, обеспечивающая устойчивость к сдвигу и расслоению витков намотки, при их использовании в качестве армирующих структур композиционных материалов.

9. Главным критерием, определяющим структуру прецизионных 3D намоток, является суммарный угол сдвига между витками различных пар слоев намотки, создаваемый каждой системой нитей (базовой и перевивочных структур), используемых в формировании многослойной мотальной паковки.

10. Структуры трехмерных (ортогональных) 3D намоток имеют малый изгиб нитей (волокон) в объеме «преформ», или вообще не имеют его а, следовательно, механические свойства волокон в готовом конечном изделии практически полностью сохраняются.

11. Структуры разверток 3D намоток на плоскость можно сопоставить с многослойными ткаными структурами, т.к. они формируются из нескольких систем нитей, перевивающихся между собой в смежных слоях по трем координатным осям и имеют заданные параметры (длина, ширина, толщина). Данные структуры текстильных полотен пригодны для получения плоских изделий, в виде композиционных материалов с разнообразными геометрическими формами и размерами.

12. Прочностные параметры 3D намоток - коэффициенты жесткости и связности, являются «чистой» прочностной характеристикой их структур, так как он базируется на количестве перевивок (пересечек) между нитями базовой и перевивочной структур. Именно эти показатели определяют склонность структуры к расслоению или сдвигу витков в слоях намотки, а, следовательно, определяют пригодность к использованию при проектировании прочных армирующих структур композиционных материалов, используемых в экстремальных условиях.

13. Структуры сомкнутых намоток, независимо от вида используемых нитей, имеют максимально возможный коэффициент заполнения объема композиционных материалов волокнистым наполнителем, который равен 0,785. Все остальные текстильные структуры (ткани, трикотаж, нетканые полотна) могут только приближаться к данному значению, ввиду более рельефной, рыхлой и объемной структуры.

14. Для формирования прецизионных структур 3D намоток необходимо специальное мотальное оборудование, оснащенное ПЭВМ.

### **Глава 3. Исследование факторов, оказывающих влияние на структуру наполнителей композиционных материалов, формируемых на базе мотальных паковок**

Как отмечается в работах [70], качественные характеристики композиционных материалов, формируемых намотками, во многом определяются структурой наполнителей, на формирование которой оказывают влияние многие факторы, такие как:

- натяжение нитей;
- угол скрещивания витков;
- степень прессования намотки и т.д.

Рассмотрим их влияние подробнее.

#### **3.1. Исследование влияния угла скрещивания витков на структуру цилиндрических армирующих оболочек, формируемых параллельной намоткой**

В работе [58] указано, что при создании композиционных пространственно-армированных оболочек различного назначения используются различные намотки. К ним относятся такие виды, как спирально-кольцевая, планетарная (плоскостная, орбитальная, кольцевая, тангенциальная и т.д.). Однако, в теории наматывания мотальных паковок все, указанные выше намотки нитевидного материала на паковки (оправки) подразделяются всего на два вида структур, и отличаются друг

от друга только по одному технологическому параметру – углу скрещивания витков  $\beta$  (или углу подъема витков  $\alpha = \frac{\beta}{2}$ ), т.е. на параллельные и крестовые. Отличие данных структур подробно описано в работах [64,70].

Параллельные намотки формируются с малым углом подъема витков, чаще равным условному диаметру нити (ширине жгута), и называются параллельно-сомкнутые. К ним следует относить и гексагональные укладки, как частный случай параллельных намоток, и формирование которых возможно только в пределах одного жгута, так как при пересечении 2х и более жгутов на паковке будет формироваться крестовая намотка (что было доказано ранее в разделе 2.1). Данные структуры характеризуются низкой прочностью закрепления витков, особенно на торцевых участках паковки, и склонностью к разрушению при внешних механических воздействиях (при намотке без фланцев). Параллельная («кольцевая») намотка имеет высокую удельную плотность – отношение веса нити к занимаемому ее объему. Максимальное заполнение объема намотки нитью будет при параллельной намотке с углом сдвига витков равным условному диаметру нити, т.е. сомкнутой намотке. Также на величину удельной плотности намотки влияют структуры самой нити (расположение в ней филаментов) и расположение нитей в жгуте (при намотке оболочек жгутами). Чем равномернее (по диаметру) нить, тем выше может быть удельная плотность намотки формируемой паковки.

Важное значение на удельную плотность намотки оказывает натяжение нити, способствующее уплотнению структуры, причем вышележащие витки давят в радиальном направлении на нижние.

Для определения величины удельного давления всех витков на оправку рассмотрим разрез параллельной намотки на цилиндрическую оправку, показанный на рисунке 3.1.

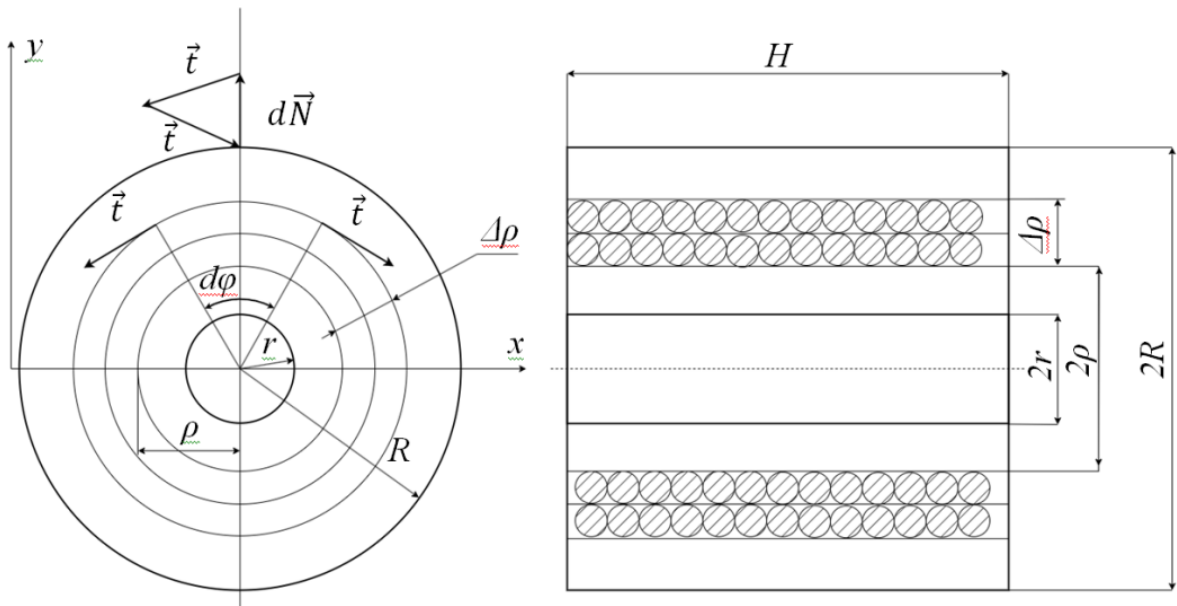


Рисунок 3.1 — Разрез паковки параллельной намотки.

Для определения величины удельного давления вышележащих витков на нижние и суммарное давление намотки на оправку выделим на поверхности паковки элементарный участок нити длиной  $dl = R d\varphi$ . Под действием сил натяжения  $t$  действующим на концы отрезка нити возникает нормальное давление данного витка  $dN$ , направленное к оси паковки.

Из условия равновесия отрезка нити следует

$$\frac{dN}{2} = t \sin \frac{d\varphi}{2} \quad (3.1)$$

принимая угол  $d\varphi$  очень малым, можем записать

$$\frac{dN}{2} \approx t \frac{d\varphi}{2}, \text{ или } dN = t d\varphi \quad (3.2)$$

Удельное давление данного отрезка нити составит

$$g_l = \frac{dN}{dl} = \frac{dN}{\rho d\varphi} = \frac{t d\varphi}{\rho d\varphi} = \frac{t}{\rho} \quad (3.3)$$

Суммарное давление всех витков в слое намотки на нижележащие будет зависеть от числа витков в данном объемном слое  $V$

$$\Delta N = i dN. \quad (3.4)$$

На рисунке 3.2 показана схема элементарного объема намотки мотальной паковки.

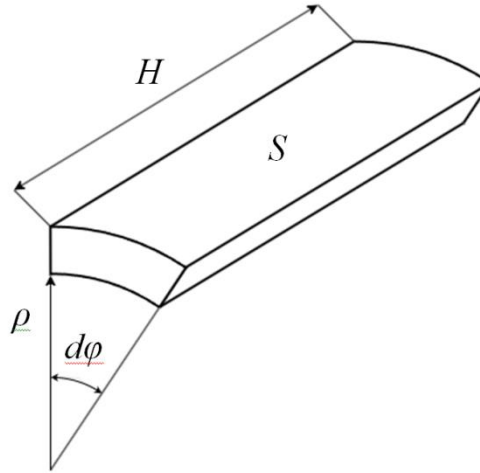


Рисунок 3.2 — Схема элементарного объема намотки.

Очевидно, что

$$\Delta V = 2\pi H \rho \Delta \rho [\text{см}^3], \quad (3.5)$$

Все нити в элементарном объеме

$$\Delta G = \gamma \Delta V = 2\pi H \rho \Delta \rho \gamma [\text{г}], \quad (3.6)$$

Вес нити в элементе

$$g = \frac{lT}{10^5} = \frac{2\pi \rho T}{10^5} [\text{г}],$$

где  $T$  – линейная плотность нити (жгута) в тексах.

Число витков в выделенном элементарном объеме составит

$$i = \frac{\Delta G}{g} = \frac{2\pi H \rho \Delta \rho \gamma 10^5}{2\pi \rho T} = \frac{H \Delta \rho \gamma 10^5}{T} \quad (3.7)$$

Нормальное давление слоя намотки деленного объема

$$\Delta N = \frac{H \Delta \rho \gamma t 10^5}{T} d\varphi \quad (3.8)$$

Так как площадь элемента намотки

$$S = H \rho d\varphi \quad (3.9)$$

Тогда величина удельного давления слоя намотки выделенного объема

$$\Delta g = \frac{\Delta N}{S} = \frac{H \Delta \rho \gamma t 10^5 d \varphi}{T H \rho d \varphi} = \frac{\gamma t 10^5 \Delta \rho}{T \rho} \quad (3.10)$$

$$dg = \frac{\gamma t 10^5}{T} \cdot \frac{d\rho}{\rho}$$

Следовательно, суммарное давление слоев намотки на оправку составит

$$g = \int_r^R dg = \int_r^R \frac{\gamma t 10^5}{T} \cdot \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\gamma t 10^5}{T} \int_r^R \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\gamma t 10^5}{T} (\ln R - \ln r) = \frac{\gamma t 10^5}{T} \ln \frac{R}{r} \quad (3.11)$$

Проведенный анализ показал, что давление слоев намотки на оправку при параллельной намотке ( $\beta = 0$ ) нитей (жгутов) на цилиндрическую паковку пропорционально натуральному логарифму отношения наружного радиуса намотки к радиусу оправки и обратно пропорционально линейной плотности наматываемой нити.

Давление вышележащих слоев (витков) намотки на нижние и оправку приводит к их уплотнению и повышению коэффициента заполнения объема намотки волокнистым армирующим материалом. То есть увеличение натяжения нити приводит к возрастанию плотности намотки, но оно ограничено разрывной нагрузкой нити.

### 3.2. Исследование влияния угла скрещивания витков на структуру цилиндрических армирующих оболочек, формируемых крестовой намоткой.

Рассмотрим влияние натяжения нити (жгута) на величину давления вышележащих витков намотки на нижние и оправку, возникающее при крестовой («спиральной») намотке на цилиндрическую паковку. Для этого рассмотрим рисунок 3.3, на котором изображена схема крестовой намотки нити на паковку и развертка витков наружного слоя.

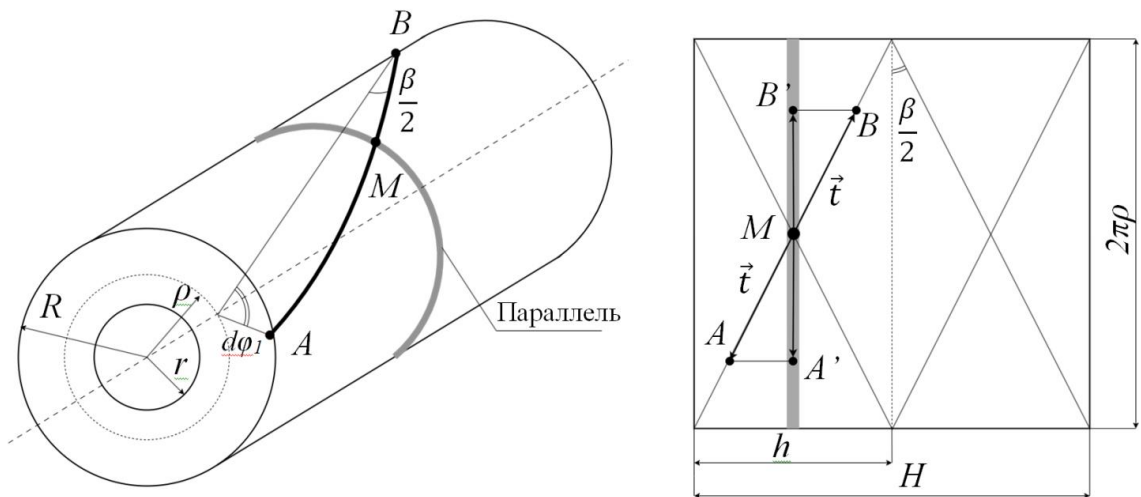


Рисунок 3.3 — Схема крестовой намотки нити на паковку и ее развертка.

Рассмотрим положение элементарного отрезка нити АВ и его пересечения в точке М с параллелью торцу паковки.

Длина элементарного участка нити находящегося под натяжением  $t$  определится по формуле

$$dl = AB = \frac{\rho d\varphi}{\cos \frac{\beta}{2}} \quad (3.12)$$

Давление витка на намотку

$$dN = t \cos \frac{\beta}{2} d\varphi \text{ или } g_l = \frac{dN}{dl} \quad (3.13)$$

Так как  $dl = \frac{\rho d\varphi}{\cos \frac{\beta}{2}}$ , то  $g_l = \frac{dN}{dl} = \frac{t \cos \frac{\beta}{2} d\varphi \cos \frac{\beta}{2}}{\rho d\varphi} = \frac{t \cos^2 \frac{\beta}{2}}{\rho}$  (3.14)

$$\Delta g = \frac{\Delta N}{S} = \frac{10^5 t \gamma \cos^3 \frac{\beta}{2} \Delta \rho}{T \rho},$$

а  $q = \frac{10^5 t \gamma \cos^3 \frac{\beta}{2}}{T} \ln \frac{R}{r} \left[ \frac{\Gamma \cdot \text{см}}{\text{см}^3 \cdot \Gamma} = \frac{1}{\text{см}^2} \right]$  (3.15)

Анализ формулы 3.15 показывает, что при крестовой намотке нити (жгута) на цилиндрическую паковку, давление вышележащих слоев на нижние и оправку будет ниже, чем при параллельной намотке, ввиду наличия угла скрещивания витков  $\beta$ , исключающего врезание верхних витков нити в толщу намотки и уплотнения её структуры.

### 3.3. Исследование влияния угла скрещивания витков на структуру оболочек имеющих криволинейную поверхность, формируемых крестовой намоткой.

Так как, при армировании композиционных материалов, применяется много оправок имеющих криволинейную поверхность, так же рассмотрим влияние натяжения нити, наматываемой на криволинейную поверхность, и величину давления вышележащих слоев намотки на нижележащие и оправку.

Для исследования этого вопроса рассмотрим схему витков нити на криволинейной (конической) поверхности, показанную на рисунке 3.4.

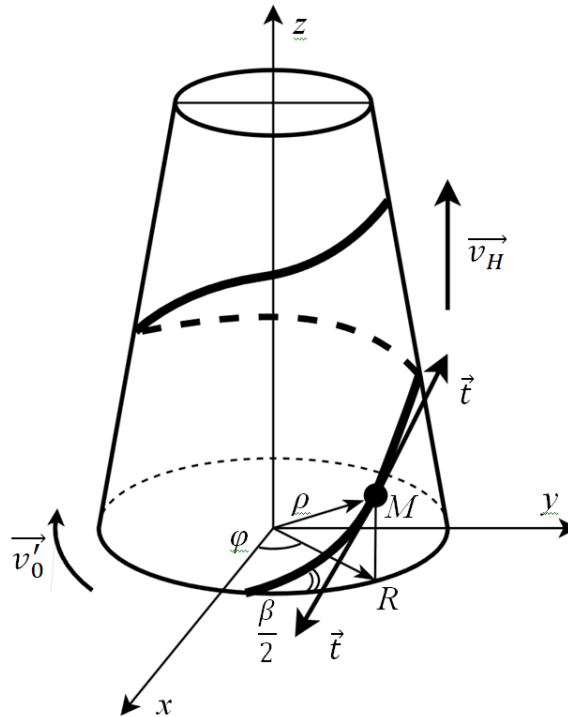


Рисунок 3.4 — Оправка криволинейной (конической) поверхности.

Выделим элемент витка нити на поверхности паковки в точке М длиной  $dl$ .

Отрезок выделенного элемента нити определим по формуле

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}, \quad (3.16)$$

где  $x = \rho \cos \varphi; y = \rho \sin \varphi; z = \frac{h}{2\pi} \varphi$ .

При намотке нити паковка поворачивается вокруг оси  $z$  с окружной скоростью  $\overline{V}_0$ , а нить перемещается вдоль образующей со скоростью  $\overline{V}_H$ . Изменение координат точки М в пространстве будет соответственно

$$dx = -\rho \sin \varphi; dy = \rho \cos \varphi; dz = \frac{h}{2\pi} \varphi,$$

где  $h$  – шаг витков намотки

$\rho$  – текущий радиус намотки

тогда 
$$dl = \sqrt{\rho^2 \sin^2 \varphi + \rho^2 \cos^2 \varphi + \frac{h^2}{4\pi^2}} d\varphi \quad (3.17)$$

При повороте паковки на угол  $\varphi = \omega t$ , где  $\omega$  – частота вращения мотальной паковки

Скорость перемещения точки М

$$V_x = \frac{dx}{dt} = -\omega R \sin \omega t$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = \omega R \cos \omega t$$

$$V_z = \frac{dz}{dt} = \frac{h\omega}{2\pi}$$

Окружная скорость перематывания нити

$$\begin{aligned} V_0 &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(-\omega R \sin \omega t)^2 + (\omega R \cos \omega t)^2} = \sqrt{\omega^2 R^2 \sin^2 \omega t + \omega^2 R^2 \cos^2 \omega t} \\ &= \omega R \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = \omega R \end{aligned}$$

Скорость переносного движения нити (раскладчика нити)  $V_H = V_z = \frac{h\omega}{2\pi}$

Угол скрещивания витков  $tg \frac{\beta}{2} = \frac{V_H}{V_0} = \frac{h\omega}{2\pi\omega R} = \frac{h}{2\pi R}$

Представим перемещения вектора  $\bar{r}$  точки М в виде

$$\bar{r} = x\bar{i} + y\bar{j} + z\bar{k} \quad (3.18)$$

или 
$$\bar{r} = \bar{i}R \cos \varphi + \bar{j}R \sin \varphi + \bar{k} \frac{h}{2\pi} \varphi \quad (3.19)$$

Перепишем данное выражение следующим образом

$$\bar{r} = \bar{i}R \cos \varphi + \bar{j}R \sin \varphi + \bar{k} \frac{hR}{2\pi R} \varphi \quad (3.20)$$

Обозначим 
$$\frac{h}{2\pi R} = m,$$

тогда 
$$\bar{r} = \bar{i}R \cos \varphi + \bar{j}R \sin \varphi + \bar{k} R m \varphi \quad (3.21)$$

Для проведения дальнейших расчетов используем выражение квадрата кривизны винтовой линии, приведенном в работе [67].

$$K^2 = \frac{\left| \frac{d\bar{r}}{d\varphi} \cdot \frac{d^2\bar{r}}{d\varphi^2} \right|^2}{\left\{ \left( \frac{d\bar{r}}{d\varphi} \right)^2 \right\}^3} \quad (3.22)$$

Учитывая то что

$$\frac{d\bar{r}}{d\varphi} = -\bar{i}R\sin\varphi + \bar{j}R\cos\varphi + \bar{k}Rm$$

$$\frac{d^2\bar{r}}{d\varphi^2} = -\bar{i}R\cos\varphi - \bar{j}R\sin\varphi$$

$$\text{тогда } \frac{d\bar{r}}{d\varphi} \cdot \frac{d^2\bar{r}}{d\varphi^2} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ -R\sin\varphi & R\cos\varphi & Rm \\ -R\cos\varphi & -R\sin\varphi & 0 \end{vmatrix} = \bar{i}R^2m\sin\varphi - \bar{j}R^2m\cos\varphi + \bar{k}R^2$$

$$\begin{aligned} \text{или } \left( \frac{d\bar{r}}{d\varphi} \cdot \frac{d^2\bar{r}}{d\varphi^2} \right)^2 &= (\bar{i}R^2m\sin\varphi - \bar{j}R^2m\cos\varphi)^2 + 2(\bar{i}R^2m\sin\varphi - \\ &\quad \bar{j}R^2m\cos\varphi)\bar{k}R^2 + \\ &+ \bar{k}^2R^4 = \bar{i}^2R^4m^2\sin^2\varphi - 2\bar{i}\bar{j}m^2\sin\varphi\cos\varphi R^4 + \bar{j}^2R^4m^2\cos^2\varphi + 2\bar{i}\bar{k}R^4m\sin\varphi - \\ &- 2\bar{j}\bar{k}R^4m\cos\varphi + \bar{k}^2R^4 = R^4m^2\sin^2\varphi - 0 + R^4m^2\cos^2\varphi + 0 - 0 + R^4 = \\ &= R^4m^2(\sin^2\varphi + \cos^2\varphi) + R^4 = R^4(1 + m^2) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\left( \frac{d\bar{r}}{d\varphi} \right)^2 = R^2\sin^2\varphi + R^2\cos^2\varphi + R^2m^2 = R^2(1 + m^2) \quad (3.24)$$

$$\text{Тогда } K^2 = \frac{R^4(1+m^2)}{[R^2(1+m^2)]^3} = \frac{1}{R^2(1+m^2)^2}$$

$$K = \frac{1}{R(1+m^2)} \quad (3.25)$$

Радиус кривизны витка

$$R_{\text{кр}} = \frac{1}{K} = R(1 + m^2) \quad (3.26)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{h}{2\pi R}$$

$$m = \frac{h}{2\pi R}, \quad (3.27)$$

так как  $h = 2\pi R \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$  и  $m = \frac{2\pi R \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{2\pi R} = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2},$

тогда  $R_{\text{кр}} = R \left( 1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} \right) \quad (3.28)$

Если  $\frac{\beta}{2} = 0^\circ$ , то  $R_{\text{кр}} = R;$

Если  $\frac{\beta}{2} = 90^\circ$ , то  $R_{\text{кр}} = \infty$  т.к.  $\operatorname{tg} 90^\circ = \infty.$

Такое расположение витка на поверхности паковки возможно только при  $V_0=0$ , как показано на рисунке 3.5, где изображено положение витка на поверхности паковки, только при переносном движении нити.

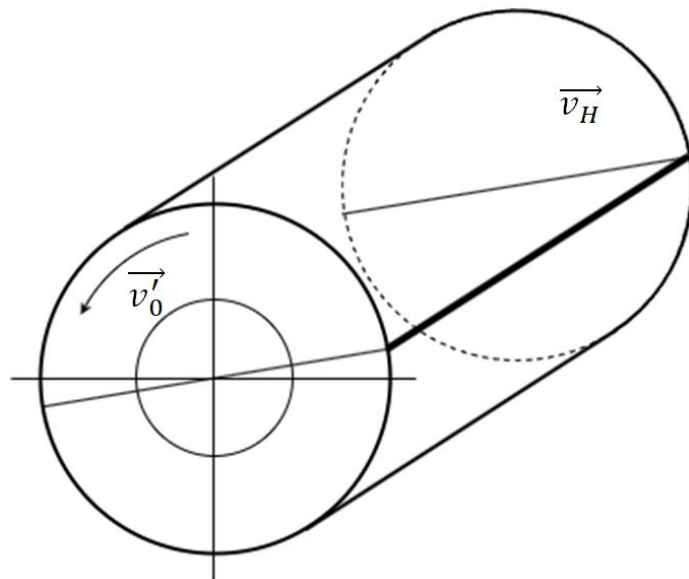


Рисунок 3.5 — Положение витка намотки при  $\frac{\beta}{2} = 90^\circ$ .

Учитывая положенные выражения, используя их при расчете давления витков нити на нижележащие слои и оправку:

$$dl = \sqrt{\rho^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}} d\varphi; R_{кр} = \rho \sqrt{1 + tg^2 \frac{\beta}{2}} \quad (3.29)$$

Тогда  $dl = \rho \sqrt{1 + \frac{h^2}{4\pi^2 \rho^2}} d\varphi = \rho \sqrt{1 + tg^2 \frac{\beta}{2}} d\varphi = R_{кр} d\varphi$

Следовательно,  $\varphi_1 = \varphi$  и  $d\varphi_1 = d\varphi$ , отсюда

$$dN = td\varphi и g_l = \frac{dN}{dl} = \frac{td\varphi}{\rho \sqrt{1 + tg^2 \frac{\beta}{2}} d\varphi} = \frac{t}{\rho \sqrt{1 + tg^2 \frac{\beta}{2}}},$$

но  $\sqrt{1 + tg^2 \frac{\beta}{2}} = \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}},$

поэтому  $g_l = \frac{t \cos \frac{\beta}{2}}{\rho} \quad (3.30)$

Изменение объема

$$\Delta V = 2\pi H \rho \Delta \rho \text{ [см}^3\text{]}$$

Изменение веса нити в объеме

$$\Delta G = \gamma \Delta V = 2\pi H \rho \Delta \rho \gamma \text{ [г]}$$

Длина витков нити в выделенном объеме

$$l = \int_0^\varphi \rho \sqrt{1 + tg^2 \frac{\beta}{2}} d\varphi = \rho \frac{\varphi}{\cos \frac{\beta}{2}} = \frac{2\pi \rho}{\cos \frac{\beta}{2}}$$

Вес нити  $g = \frac{lT}{10^5} = \frac{2\pi \rho T 10^{-5}}{\cos \frac{\beta}{2}}$

Число витков в объеме намотки

$$i = \frac{\Delta G}{g} = \frac{2\pi H \rho \Delta \rho \gamma 10^5 \cos \frac{\beta}{2}}{T 2\pi \rho} = \frac{H \Delta \rho \gamma \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T}$$

$$\Delta N = i dN = \frac{H \Delta \rho \gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T} d\varphi$$

Площадь намотки выделенного объема

$$S = H \rho d\varphi$$

$$\Delta g = \frac{\Delta N}{S} = \frac{H \Delta \rho \gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5 d\varphi}{T H \rho d\varphi} = \frac{\Delta \rho \gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T \rho}, \text{ следовательно}$$

$dg = \frac{\gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T} \frac{d\rho}{\rho}$ , суммируя получим, что общее давление витков нити на криволинейной поверхности оправки составит

$$\begin{aligned} g &= \int_r^R dg = \int_r^R \frac{\gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T} \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T} \int_r^R \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T} (\ln R - \ln r) = \\ &= \frac{\gamma t \cos \frac{\beta}{2} 10^5}{T} \ln \frac{R}{r} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Размерность

$[g] = \frac{\text{г} \cdot \text{см} \cdot \text{сН}}{\text{см}^3 \cdot \text{г}} = \frac{\text{сН}}{\text{см}^2}$  (зависит от того в чем выражать величину силы натяжения  $t$ ).

Проведя сравнительный анализ полученных формул 3.11; 3.15 и 3.31 можно сделать следующие выводы:

- величина угла скрещивания витков  $\beta$  наибольшее влияние оказывает на структуры параллельных и замкнутых (не сомкнутых) намоток, когда вышележащие витки намотки нитей могут врезаться в толщу намотки и уплотнять ее;

- при крестовой намотке нити (жгута) на цилиндрическую паковку, давление вышележащих слоев намотке нитей на нижние и оправку будет ниже, чем при параллельной намотке;
- кривизна поверхности намотки мотальной паковки не оказывает большого влияния на удельную плотность намотки мотальных паковок.

### 3.4. Исследование влияния степени прессования на структуру замкнутых 3D намоток

Влияние степени прессование намотки укатывающим роликом (или шпателем при нанесении смолы) можно охарактеризовать величиной удельного давления (интенсивностью уплотняющей нагрузки):

$$q_c = \frac{N_r}{H} \left[ \frac{H}{\text{см}} \right], \quad (3.32)$$

где  $N_r$  - нормальная реакция, действующая на намотку со стороны укатывающего ролика.

С увеличением степени прессования намотки  $q_c$ , происходит смятие нитей (особенно в местах их пересечения), уменьшается толщина намотанного слоя, и несколько возрастает  $k_z$  и  $\gamma$ . На рисунке 3.6 показан характер изменения удельной плотности намотки  $\gamma$  по мере увеличения степени прессования намотки  $q_c$  мотальным барабанчиком при перематывании х/б пряжи на автомате «Foster» (США). Из графика рисунка 3.6 видно, что с увеличением степени прессования вначале плотность намотки нити возрастает довольно быстро, вследствие

увеличения коэффициента заполнения  $k_3$  паковки волокнистым материалом (намотка замкнутая – не сомкнутая).

В дальнейшем рост плотности намотки замедляется вследствие того, что коэффициент заполнения достигает максимального значения для «застылистых» намоток равного 0,5.

Аналогичная зависимость существует между плотностью намотки мотальной паковки и натяжением наматываемой нити.

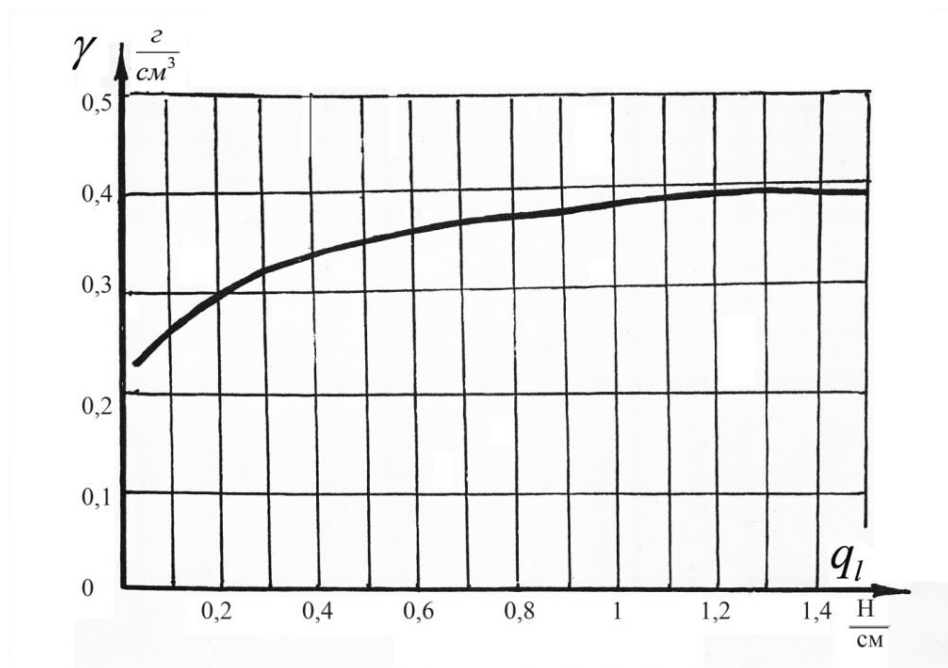


Рисунок 3.6 — Зависимость удельной плотности намотки мотальной паковки от степени прессования намотки укатывающим роликом.

Именно благодаря натяжению создается прессующий эффект вышележащих слоев намотки на нижележащие слои [60].

$$q = \frac{10^5 K \gamma \cos^3 \frac{\beta}{2}}{T} \ln \frac{R_1}{R_2} \left[ \frac{\text{Н}}{\text{см}^2} \right], \quad (3.33)$$

где  $K$  - натяжение наматываемой нити;

$\beta$  - угол скрещивания витков;

$T$  - линейная плотность нити, текс;

$R1$  и  $R2$  - соответственно внутренний и наружный радиусы намотки слоя.

Вследствие чрезмерного натяжения нити и давления наружных слоев на внутренние, происходит выдавливание последних на торцы паковки. Это приводит к нарушению структуры намотки, а повышения коэффициента заполнения объема волокнистым материалом не наблюдается.

Как было показано ранее, изменение угла скрещивания витков в процессе формирования мотальных паковок, формируемых на прецизионном мотальном оборудовании, слабо влияет на прочностные характеристики только при сомкнутой структуре намотки [60]. Это обусловлено максимальным заполнением нитевидным материалом всего объема паковки (вне зависимости от величины угла скрещивания витков -  $\beta$ ).

Именно данное свойство структуры сомкнутых намоток дает возможность создавать композитные материалы с максимальным содержанием в общем объеме компонента текстильного армирующего компонента (наполнителя), при минимальном содержании связующих материалов (смола). Следовательно, сомкнутая структура намотки позволит получать максимально легкие и прочные армирующие текстильные компоненты композитов по сравнению с материалами других текстильных структур (тканей, нетканых полотен, трикотажем, отдельными волокнами и нитями) при равных их объемах.

### **Выводы по главе 3**

1. Натяжение нити (жгутов) в процессе намотки оболочек оказывает существенное влияние на уплотнение структур формируемых паковок, и оно возрастает с увеличением числа слоев (толщины) намотки;

2. Наибольшее влияние на увеличение плотности намотки вследствие давления верхних витков нити на нижележащие слои и оправку достигается при параллельной намотке;

3. Крестовые намотки на мотальных паковках любой кривизны при перемотке малорастяжимых нитей (углеродных) менее уплотняются за счет повышения натяжения нити и перераспределения давления в слоях намотки.

4. У замкнутых намоток с увеличением степени прессования вначале плотность намотки возрастает довольно быстро, вследствие увеличения коэффициента заполнения  $k_z$  паковки волокнистым материалом, а в дальнейшем рост плотности намотки замедляется вследствие того, что коэффициент заполнения достигает максимального значения (для замкнутых намоток равного 0,5).

## **Глава 4. Исследование процессов формирования наполнителей композиционных материалов, формируемых на базе мотальных паковок произвольной формы**

Армирование композиционных материалов намоточными структурами заданной формы и кривизны поверхности, требует решения ряда вопросов, связанных с определением закономерности движения раскладчика нити вдоль образующей паковки в течение всего процесса формирования заготовки, исключения искажения заданной формы намотки за счет изменения величины «свободного отрезка нити» между раскладчиком нити и точкой входа нити в паковку. Кроме того, для формирования прецизионных структур намоток необходимо специальное мотальное оборудование, обладающего конструктивными особенностями, позволяющими изменять параметры намотки в процессе формирования паковок заданной кривизны поверхности.

### **4.1. Исследование закономерности движения раскладчика нити при армировании намоткой паковок произвольной формы**

Наименьшее искажение формы намотки нити (нитевидного материала) на оправку (паковку), за счет влияния величины «свободного отрезка нити» между точкой раскладки и точкой входа нити в намотку, будет в том случае, когда этот отрезок минимален и составляет  $1 \div 2$  мм.

С целью упрощения теоретических расчетов отождествим движение точки наматывания (точки входа нити в намотку) и глазка раскладчика нити [69].

Пусть требуется сформировать намоткой паковку произвольной формы, показанной на рисунке 4.1. Определим, при каком законе движения раскладчика нити может быть получена указанная форма намотки. Для этого разобьем намотку на ряд элементарных колец плоскостями, перпендикулярными к оси вращения паковки. Если число таких плоскостей достаточно велико, то каждое кольцо можно рассматривать как полый цилиндр высотой  $\Delta S_i$ .

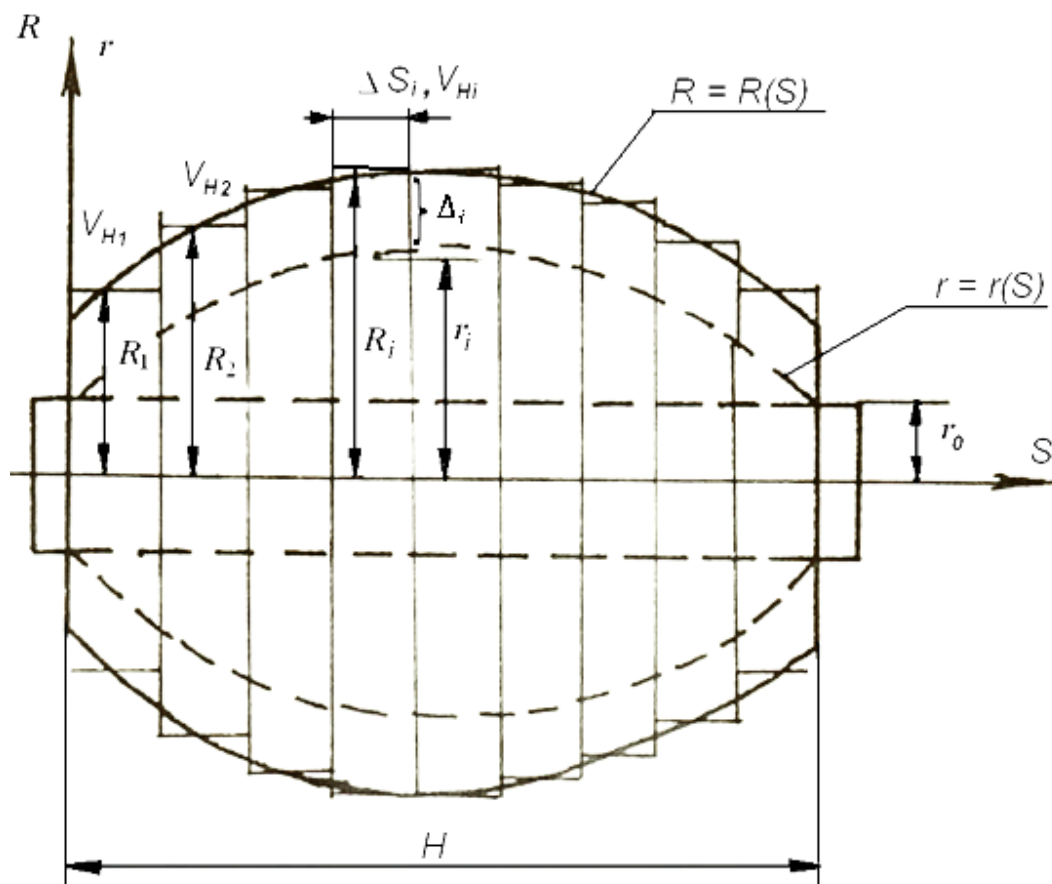


Рисунок 4.1 — Мотальная паковка произвольной формы намотки.

Предположим, что намотка производится на цилиндрический патрон радиуса  $r_0$ , тогда при повороте паковки на угол  $\varphi$  радиус намотки  $i$ -го кольца может быть определен по формуле:

$$R_i = r_0 + \frac{T * \varphi_i * 10^{-5}}{2\pi * \Delta S_i * \gamma_i}, \quad (4.1)$$

где  $T$  – линейная плотность наматываемой нити, текс;

$\varphi_i$  – угол поворота паковки за время раскладки нити на  $i$ -ом участке кольца в радианах;

$\Delta S_i$  – толщина (высота)  $i$ -го кольца, см;

$\gamma_i$  – удельная плотность намотки на  $i$ -ом участке.

Время, в течение которого нить раскладывается на  $i$ -ом участке за цикл движения (один двойной ход) раскладчика нити (нити):

$$t_{\text{ци}i} = \frac{2\Delta S_i}{v_{\text{ни}}}, \quad (4.2)$$

где  $v_{\text{ни}}$  – скорость перемещения нити на  $i$ -ом участке в осевом направлении паковки,  $\frac{\text{см}}{\text{с}}$ .

Продолжительность всего цикла движения нити вдоль образующей паковки:

$$t_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{ци}i} = \frac{2\pi k}{\omega_k}, \quad (4.3)$$

где  $k$  – число оборотов кулачка нитераскладчика за цикл его движения (один двойной ход нити);

$\omega_k$  – угловая частота вращения кулачка нитераскладчика.

Угол поворота  $i$ -го участка намотки за время  $t_{\text{ци}i}$ :

$$\varphi_{\text{ци}i} = \omega_{\text{в}} * t_{\text{ци}i} = \omega_k i_0 \frac{2\Delta S_i}{v_{\text{ни}}}, \quad (4.4)$$

где  $i_0 = \frac{\omega_{\text{в}}}{\omega_k}$  – передаточное отношение от паковки к кулачку раскладчика нити.

Общее число циклов раскладки нити на паковке при повороте веретена на угол  $\varphi$ :

$$\xi = \frac{\varphi}{2\pi k_{i0}} \quad (4.5)$$

Угол поворота  $i$ -го участка намотки при повороте паковки на угол  $\varphi$ :

$$\varphi_i = \varphi_{\text{ц}i} \xi = \frac{2\omega_k \Delta S_i i_0 \varphi}{\vartheta_{\text{н}i} * 2\pi k_{i0}} = \frac{\omega_k \Delta S_i \varphi}{\pi k \vartheta_{\text{н}i}} \quad (4.6)$$

Однако, т.к.  $\omega_k = 2\pi n_k$ , где  $n_k$  – частота вращения кулачка нитераскладчика, тогда:

$$\varphi_i = \frac{2\pi n_k \Delta S_i \varphi}{\pi k \vartheta_{\text{н}i}} = \frac{2n_k \Delta S_i \varphi}{k \vartheta_{\text{н}i}} \quad (4.7)$$

Радиус намотки нити на  $i$ -ом участке паковки:

$$R_i = r_0 + \frac{T * 10^{-5} * 2n_k \Delta S_i \varphi}{2\pi \Delta S_i \gamma_i k \vartheta_{\text{н}i}} = r_0 + \frac{T n_k \varphi * 10^{-5}}{\pi \gamma_i k \vartheta_{\text{н}i}}$$

Приращение толщины намотки при повороте паковки на угол  $\varphi$ :

$$\Delta_i = R_i - r_0 = \frac{T n_k \varphi 10^{-5}}{\pi \gamma_i k \vartheta_{\text{н}i}} \quad (4.8)$$

откуда можно выделить:

$$\Delta_i \gamma_i \vartheta_{\text{н}i} = \frac{T n_k \varphi 10^{-5}}{\pi k} = \text{const} \quad (4.9)$$

Т.е. для сохранения структуры намотки паковки заданной формы необходимо обеспечить выполнение условия:

$$\Delta_1 \gamma_1 \vartheta_{\text{н}1} = \Delta_2 \gamma_2 \vartheta_{\text{н}2} = \dots = \Delta_n \gamma_n \vartheta_{\text{н}n} \quad (4.10)$$

Поскольку угол скрещивания витков, как отмечалось ранее, оказывает незначительное влияние на удельную плотность намотки, то можно записать условие 4.10 в виде:

$$\Delta_1 \gamma_1 \vartheta_{\text{н}1} \approx \Delta_2 \gamma_2 \vartheta_{\text{н}2} \approx \dots \approx \Delta_n \gamma_n \vartheta_{\text{н}n} , \quad (4.11)$$

но т.к.:

$$\vartheta_{hi} = h_{ki} * n_k,$$

где  $h_{ki}$  – шаг канавки кулачка раскладчика нити на  $i$ -ом участке;

$n_k$  – частота вращения кулачка нитеводителя,

то если пренебречь изменением частоты вращения кулачка раскладчика нити за цикл движения последнего, можно написать:

$$\Delta_1 h_{k1} n_k = \Delta_2 h_{k2} n_k = \dots = \Delta_i h_{ki} n_k = \dots = \Delta_n h_{kn} n_k \quad (4.12)$$

или

$$\Delta_1 h_{k1} = \Delta_2 h_{k2} = \dots = \Delta_i h_{ki} = \dots = \Delta_n h_{kn} \quad (4.13)$$

Если профиль оправки, на которой формируется паковка, выполнить таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \dots = \Delta_i = \dots = \Delta_n,$$

как показано на рисунке 4.1 (штриховой линией), то должно выполняться равенство:

$$\vartheta_{h1} = \vartheta_{h2} = \dots = \vartheta_{hi} = \vartheta_{hn}. \quad (4.14)$$

Очевидно, что это же равенство должно выполняться при наматывании цилиндрической паковки на цилиндрическую оправку.

Обозначим  $P_i = \frac{2n_k}{k\vartheta_{hi}}$  и назовем эту величину линейной плотностью раскладки нити (нитевидного материала) вдоль образующей паковки, тогда:

$$R_i = r_0 + \frac{P_i T \varphi * 10^{-5}}{2\pi \gamma_i} \quad (4.15)$$

$$P_i = \frac{2n_k}{k h_{ki} n_k} = \frac{2}{k h_{ki}} \quad (4.16)$$

Если

$$h_{ki} = \frac{2H}{k}, \text{ то}$$

$$P_i = P = \frac{2k}{k2H} = \frac{1}{H}; \frac{\text{нить}}{\text{см}}. \quad (4.17)$$

В этом случае условие 4.10 может быть записано следующим образом:

$$\frac{\Delta_1 \gamma_1}{P_1} = \frac{\Delta_2 \gamma_2}{P_2} = \dots = \frac{\Delta_n \gamma_n}{P_n}. \quad (4.18)$$

Следовательно, можно сделать вывод о том, что на участках паковки произвольной (заданной) формы с большей толщиной намотки, линейная плотность раскладки нити должна быть больше.

Возникает вполне закономерный вопрос: «Всегда ли выполнимо равенство 4.10?».

Очевидно, что при очень крутой зависимости  $R = R(S)$  на участках с очень большой толщиной намотки  $\Delta_i$  скорость осевого перемещения нитераскладчика (нити)  $v_{ni}$  будет очень малой и на паковке будет образовываться параллельная намотка со всеми ее отрицательными свойствами (врезанием верхних витков в толщу намотки, их переуплотнением неравновесностью витков и т.д.).

Ранее, нами отмечалось в работе [60], что при формировании паковок произвольной формы намотки должно выполняться условие равновесного положения нити на поверхности намотки (условие формы проф. А.П. Минакова):

$$tg\theta \leq f_{max},$$

где  $\theta$  – угол геодезического отклонения;

$f_{max}$  – максимальный коэффициент трения нити о поверхность намотки,  
или

$$tg\theta = \frac{\frac{d}{ds}(R \cos \frac{\beta}{2})}{\cos^2 \frac{\beta}{2} - g \sin^2 \frac{\beta}{2}} \quad (4.19)$$

Из данной формулы видно, что характер зависимости  $R = R(S)$ , оказывает существенное влияние на величину угла геодезического отклонения, а,

следовательно, и на равновесность намотки. т.е. на прочностные свойства формируемой структуры намотки.

Данное условие необходимо учитывать при проектировании форм намотки паковок и конструировании оправок для их формирования.

Сохранение целостности структуры намотки, в данном случае, можно добиваться различными способами (например – пропиткой нитей на данных участках паковки экспресс клеями и т.д.).

#### **4.2. Определение величины угла поворота мотальной паковки при образовании на ней заданной формы намотки**

Одним из основных факторов, формирования армирующих преформ заданной кривизны поверхности на цилиндрических оправках, является величина угла поворота мотальной паковки, при котором процесс будет завершен. Для определения величины угла поворота мотальной паковки при образовании на ней заданной формы намотки рассмотрим разрез паковки эллипсовидной формы, которая изображена на рисунок 4.2.

Из ранее проведенных теоретических исследований известно (4.1), что радиус намотки мотальной паковки на  $i$ -ом участке определяется как:

$$R_i = r_0 + \frac{Tn_k \varphi * 10^{-5}}{\pi \gamma_i k \vartheta_{hi}}$$

Из заданного выражения видно, что  $R_i$  зависит от угла поворота паковки  $\varphi$ , а, следовательно, и профиль (форма) намотки также будет зависеть от величины указанного угла.

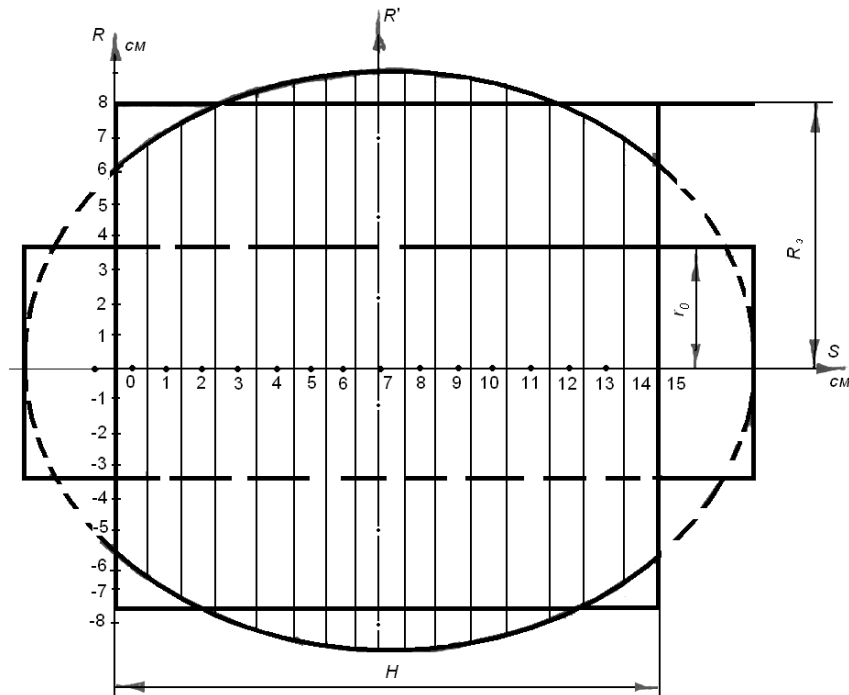


Рисунок 4.2 — Паковка эллипсовидной формы.

Возникает закономерный вопрос: «При каком значении угла поворота паковки  $\varphi_n$  намотка примет заданную форму?».

Пусть, при  $\varphi = \varphi_n$  заданная форма намотки определяется заранее принятой зависимостью  $R = R(S)$ , тогда объем нити, намотанной на паковку при достижении заданной формы, может быть определен по формуле:

$$V = \pi \int_0^H R^2 dS - \pi r_0^2 H. \quad (4.20)$$

Очевидно, заданное тело вращения с объемом  $V$  можно заменить полым цилиндром такого же объема, имеющего радиус намотки  $R_3$  объем указанного полого цилиндра:

$$V = \pi R_3^2 H - \pi r_0^2 H (R_3^2 - r_0^2) \quad (4.21)$$

Приравнивая правые части выражения 4.20 и 4.21, получаем:

$$R_3 = \sqrt{\frac{\int_0^H R^2 dS}{H}} \quad (4.22)$$

Если положить, что коэффициенты заполнения осевых разрезов (а, следовательно, и коэффициенты объемного заполнения) паковки заданной формы и полого цилиндра поперечными срезами нитей будут одинаковы, то число витков в осевых разрезах паковки произвольной формы и полого цилиндра будет также одинаковым.

Равенство числа витков в указанных объемах определяет и равенство углов поворота, сделанных рассматриваемыми паковками  $\varphi$  при их формировании, т.к. каждый виток намотки соответствует углу поворота намотки (паковки) на угол  $2\pi$ . Равенство коэффициентов объемного заполнения определяет равенство удельных плотностей намоток паковок заданной формы и полого цилиндра.

Таким образом, если объемы паковок произвольной формы намотки одинаковы, а объемные плотности равны, то углы их поворота, обеспечивающие заданную форму намотки, будут также одинаковыми.

Радиус намотки эквивалентного полого цилиндра:

$$R_3 = r_0 + \frac{T \cdot \varphi \cdot 10^{-5}}{2\pi H \gamma}. \quad (4.23)$$

Угол поворота паковки, при котором на ней сформируется намотка заданной формы:

$$\varphi = \varphi_n = \frac{(R_3 - r_0) 2\pi H \gamma \cdot 10^{-5}}{T}, \text{ (радиан)} \quad (4.24)$$

Таким образом, для формирования армирующих компонентов композиционных материалов с помощью намотки нитей (нитевидного материала) на оправку заданной формы и размеров можно расчетным путем определить необходимое число оборотов паковки до ее полного формирования.

Коэффициент заполнения объема формируемого тела вращения (паковки заданной формы) текстильным армирующим компонентом может задаваться величиной удельной плотности намотки  $\gamma$ , Причем максимальное значение

коэффициента заполнения  $k_3=0,785$  обеспечивает сомкнутая структура намотки нитей, когда удельная плотность намотки нитей на цилиндрическую паковку равна:

$$\gamma = \frac{1}{c^2}, \quad (4.25)$$

где  $c$  – объемная плотность нити и ее волокнистого состава, из которого она изготовлена.

Очевидно также, что коэффициент заполнения объема тела паковки текстильным армирующим компонентом будет определяться и зависимостью -  $R = R(S)$ , т.е. кривизной поверхности (формой намотки) паковки.

#### **4.3. Разработка методов проектирования мотальных механизмов для создания паковок заданной формы на цилиндрических оправках**

Очевидно, что формирование мотальных паковок с образующей криволинейной (заданной) формы на цилиндрических оправках возможно лишь на мотальных машинах с раздельным действием механизмов намотки и раскладки нити (прецизионных мотальных машинах). Данные машины позволяют обеспечить требуемые параметры намотки и переменные (заданные) величины передаточного отношения от раскладчика нити к паковке [72].

Экспериментальные исследования по созданию намотки мотальных паковок произвольной формы на цилиндрических оправках, на прецизионных мотальных машинах показали, что в начале формирования паковки её образующая точно совпадает с образующей патрона (оправки), на который наматывается нить.

В дальнейшем, при изменении величины передаточного отношения от раскладчика нити к паковке, образующая намотки становится всё более отличимой от своего первоначального вида и в конце наматывания приобретает заданную форму.

Следует заметить, что в этом случае целесообразно сохранить постоянной окружную скорость наматывания нити за всё время формирования паковки на участке с наибольшим радиусом кривизны паковки.

Она может быть определена по формуле:

$$\vartheta_{0max} = 2\pi R_{max}^{кон} \cdot n_B^{кон} = 2\pi R_{max}^{нач} \cdot n_B^{нач}, \quad (4.26)$$

где  $R_{max}^{кон}$  – максимальный радиус наматывания паковки в конце её формирования;

$n_B^{кон}$  – конечная частота вращения паковки;

$R_{max}^{нач}$  – максимальный радиус наматывания паковки в начале её формирования;

$n_B^{нач}$  – начальная частота вращения паковки.

На мотальных машинах с раздельным действием механизмов намотки и раскладки нити передаточное отношение от паковки к кулачку раскладчика нити в течение формирования паковки не изменяется, то есть:

$$i_0 = \frac{n_B}{n_k} = const \quad (4.27)$$

В этом случае при наматывании паковки произвольной формы на цилиндрической оправке, частота вращения кулачка раскладчика нити  $n_k$  будет уменьшаться, ввиду уменьшения частоты вращения веретена  $n_B$  (для сохранения постоянства максимальной окружной скорости наматывания).

Поскольку  $\vartheta_n = h_k n_k$ , будет уменьшаться и скорость перемещения глазка раскладчика нити  $\vartheta_{ni}$  на любом участке намотки.

В связи с этим формулу для определения приращения её на угол  $\varphi$  целесообразно записать в следующем виде:

$$\Delta i = R_i - r_0 = \frac{T n_k \varphi 10^{-5}}{\pi \gamma_i k \vartheta_{hi}} = \frac{T \varphi 10^{-5}}{\pi \gamma_i k h_{ki}} \quad (4.28)$$

Тангенс угла подъёма витков на  $i^{мом}$  участке уменьшается по мере наматывания паковки на всех её участках.

$$tg \frac{\beta_i}{2} = \frac{\vartheta_{Hi}}{\vartheta_{oi}} = \frac{h_{ki} n_k}{\vartheta_{oi}} = \frac{h_{ki} n_k}{2 \pi R_i n_B} = \frac{h_{ki}}{2 \pi R_i l_0} \quad (4.29)$$

Как отмечалось ранее, для предупреждения образования параллельных намоток и устранения врезания верхних витков намотки в толщу нижних необходимо, что бы на участке с наибольшим радиусом в конце формирования паковки угол скрещивания витков  $\beta_{min}$  не был меньше  $10...12^\circ$ . В этом случае:

$$tg \frac{\beta_{min}}{2} = \frac{\vartheta_H^{min}}{\vartheta_0^{min}} = 0,09 \dots 0,1.$$

И, наоборот, на участках с наименьшим радиусом намотки должно быть выполнено условие получения равновесной намотки профессора А.Н. Минакова.

$$tg \theta \leq f_{max}$$

### Рассмотрим пример.

Пусть необходимо спроектировать мотальный механизм для формирования армирующего элемента композитного материала в виде мотальной паковки эллипсовидной формы на цилиндрической оправке (рисунок 4.2.) при следующих параметрах намотки:

- радиус цилиндрического патрона  $r = 3$  см;
- высота намотки паковки  $H = 15$  см;
- удельная плотность намотки  $\gamma = 0,4$  г/см<sup>3</sup>;
- линейная плотность нити  $T = 25$  текс;
- конечная форма намотки – эллиптическая.

1. Составим уравнение образующей паковки в системе координат (R',S).

$$\left(\frac{R'}{64}\right)^2 + \frac{S^2}{100} = 1 \quad (4.30)$$

2. Определим радиус эквивалентного цилиндра, имеющего одинаковый объём с наматываемой паковки. Для этого перенесем начало координат на 7,5 см влево. Тогда уравнение образующей (эллипса) в новой системе координат будет иметь вид:

$$\frac{R^2}{64} + \frac{(S - 7,5)^2}{100} = 1$$

Откуда

$$R^2 = 64 \left[ 1 - \frac{(S - 7,5)^2}{100} \right] = -0,64S^2 + 9,6S + 28$$

$$\begin{aligned} \int_0^H R^2 dS &= \int_0^H (-0,64S^2 + 9,6S + 28) dS = \frac{0,64S^3}{3} + \frac{9,6S^2}{2} + 28S = \\ &= \frac{-0,64H^3}{3} + \frac{9,6H^2}{2} + 28H \end{aligned}$$

При  $H=15$  см имеем:

$$\int_0^H R^2 dS = \frac{-0,64 \cdot 15^3}{3} + \frac{9,6 \cdot 15^2}{2} + 28 \cdot 15 = 780 \text{ см}^3$$

Радиус эквивалентного цилиндра:

$$R_{\text{э}} = \sqrt{\int_0^H \frac{R^2 dS}{H}} = \sqrt{\frac{780}{15}} = 7,211 \text{ см}$$

Отметим, что эквивалентный радиус не изменит своего значения, если при его определении исходить из равенства площадей осевых сечений паковки произвольной формы и эквивалентного цилиндра.

Действительно, в этом случае:

$$R_{\text{э}} = \sqrt{\int_0^H \frac{R^2 dS}{H}}; \quad (4.31)$$

А так как

$$R = \sqrt{64 \left(1 - \frac{(S-7,5)^2}{100}\right)} = 0,8\sqrt{100 - (S-7,5)^2},$$

тогда [72].

$$\begin{aligned} \int_0^H R dS &= 0,8 \int_0^H \sqrt{100 - (S-7,5)^2} dS = \\ &= 0,8 \left[ \frac{(S-7,5)\sqrt{100 - (S-7,5)^2}}{2} + 50 \arcsin \frac{S-7,5}{10} \right] \end{aligned}$$

Приняв  $H=15$  см, получим:

$$\begin{aligned} \int_0^H R(dS) &= 0,8 \left[ \frac{(S-7,5)\sqrt{100 - (S-7,5)^2}}{2} + 50 \arcsin \frac{S-7,5}{10} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(15-7,5)\sqrt{100 - (-7,5)^2}}{2} - 50 \arcsin \frac{S-7,5}{10} \right] = 107,52 \text{ см}^2 \end{aligned}$$

$$R_9 = \frac{\int_0^H R dS}{H} = \frac{107,52}{15} = 7,168 \text{ см}$$

3. Угол поворота паковки при достижении заданной формы намотки

$$\varphi_{\Pi} = \frac{(R_9 - r_0) * 2\pi H \cdot \gamma 10^5}{T} = \frac{(7,211 - 3) \cdot 2\pi \cdot 15 \cdot 0,4 \cdot 10^5}{25} = 6,35 \cdot 10^5 \text{ рад}$$

4. На участке с наибольшим радиусом намотки  $R_{max}$  окружная скорость должна быть ограниченной и поддерживаться постоянной за всё время наматывания паковки.

Примем  $\vartheta_0^{max}=800$  м/мин из условий минимальной обрывности и истирания нити.

5. Тогда частота вращения веретена:

$$n_B = \frac{\vartheta_0^{max}}{2\pi R_{max}}; \quad (4.32)$$

Конечная и начальная частота вращения веретена:

$$n_B^{\text{кон}} = \frac{800}{2\pi \cdot 0,08} = 1592 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$n_B^{\text{нач}} = \frac{800}{2\pi \cdot 0,03} = 4246 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

6. Конечная максимальная толщина намотки нити на паковку:

$$\Delta_{\text{max}}^{\text{кон}} = R_{\text{max}} - r_0 = 8 - 3 = 5 \text{ см},$$

7. Согласно формуле (4.26)

$$\Delta_{\text{max}}^{\text{кон}} = \frac{T \cdot y_{\text{п}} \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot \gamma \cdot k \cdot h_{k\text{min}}} \quad (4.33)$$

Откуда:

$$h_{k\text{min}} = \frac{T \cdot y_{\text{п}} \cdot 10^{-5}}{\Delta_{\text{max}}^{\text{кон}} \cdot \pi \cdot k \cdot \gamma} = \frac{25 \cdot 6,35 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5}}{\Delta_{\text{max}}^{\text{кон}} \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 8} = 3,158 \text{ см}.$$

Но, учитывая, что:

$$\Delta_1 h_{K_1} \Delta_2 h_{K_2} = \dots = \Delta_i h_{K_i} = \Delta_{\text{max}} h_{K_{\text{max}}} \quad (4.34)$$

8. Тогда перемещение кулачка:

$$h_{K_i} = \frac{\Delta_{\text{max}} \cdot h_{K_{\text{max}}}}{\Delta_i} = \frac{3,158 \cdot 5}{\Delta_i} = \frac{15,79}{\Delta_i}, [\text{см}]$$

9. Толщина намотки на  $i$ -том участке может быть определена по формуле:

$$\Delta_i = R_i - r_0 \quad (4.35)$$

где  $R_i$  – средний радиус намотки пряжи на  $i$ -том участке паковки.

10. Угол скрещивания витков  $\beta_{\text{min}} \geq 10 \dots 12^\circ$ , или:

$$\text{tg} \frac{\beta_{\text{min}}}{2} = \frac{h_{K\text{min}}}{i_0 \cdot 2\pi \cdot R_{\text{max}}} \approx 0,1.$$

11. Из данного условия находим величину передаточного отношения от кулачка раскладчика нити к паковке, которая обеспечит формирование мотальной паковки по заданным параметрам:

$$i_0 = \frac{h_{K_{min}}}{0,2 \cdot \pi \cdot R_{max}} = \frac{3,158}{0,2 \cdot \pi \cdot 8} = 0,629 \quad (4.36)$$

12. Конечная и начальная частота вращения раскладчика нити при этом составляет:

$$n_K^{кон} = \frac{n_B^{кон}}{i_0} = \frac{1592}{0,629} = 2531 \frac{об}{мин}; \quad (4.37)$$

$$n_K^{нач} = \frac{n_B^{нач}}{i_0} = \frac{4246}{0,629} = 6750 \frac{об}{мин} \quad (4.38)$$

13. Скорость перемещения глазка раскладчика нити:

$$\vartheta_{H_i}^{кон} = \frac{h_{K_i} \cdot n_K^{кон}}{100}, \frac{м}{мин} \quad (4.39)$$

$$\vartheta_{H_i}^{нач} = \frac{h_{K_i} \cdot n_K^{нач}}{100}, \frac{м}{мин}. \quad (4.40)$$

В частности, на участке с наибольшим радиусом намотки  $R_{max}$  имеем:

$$\vartheta_{H_{min}}^{кон} = \frac{h_{K_{min}} \cdot n_K^{кон}}{100} = \frac{3,158 \cdot 2531}{100} = 79,93 \frac{м}{мин};$$

$$\vartheta_{H_{min}}^{нач} = \frac{h_{K_{min}} \cdot n_K^{нач}}{100} = \frac{3,158 \cdot 6750}{100} = 213,17 \frac{м}{мин}.$$

Соответственно, углы подъема витков:

$$\operatorname{tg} \frac{\beta_{min}^{кон}}{2} = \frac{\vartheta_{n_{min}}^{кон}}{\vartheta_{0_{max}}} = \frac{79,93}{800} = 0,1; \quad \frac{\beta_{min}^{кон}}{2} = 5,7^\circ; \quad (4.41)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta_{min}^{нач}}{2} = \frac{\vartheta_{нит}}{\vartheta_{0_{max}}} = \frac{213,17}{800} = 0,266; \quad \frac{\beta_{min}^{нач}}{2} = 14,92^\circ; \quad (4.42)$$

Расчетные параметры намотки паковки заданной формы:  $h_{ki}$ ;  $\vartheta_{Hi}^{\text{нач}}$ ;  $\vartheta_{Hi}^{\text{кон}}$ ;  $\Delta_i$  и т.д. приведены в таблице 4.1

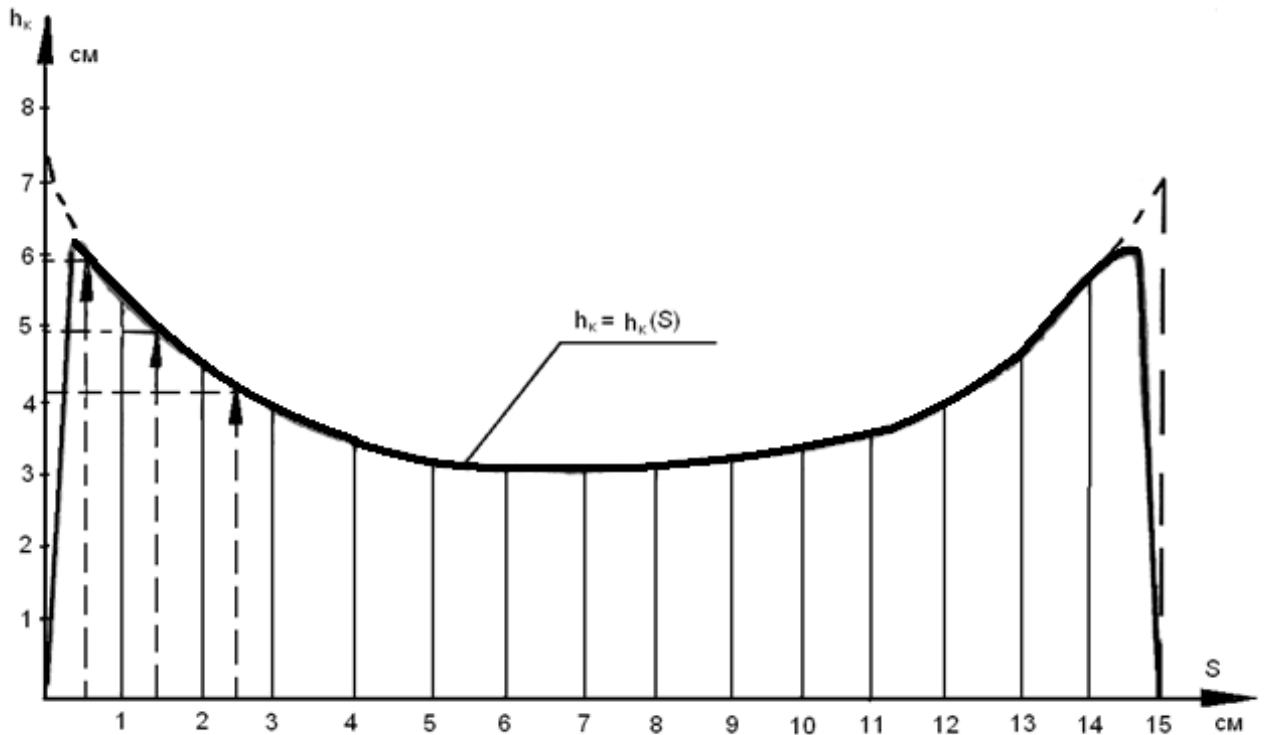
Таблица 4.1

| $S_i$ | $R_i$ | $\Delta_i$ | $h_{ki}$ | $\vartheta_{Hi}^{\text{нач}}$ | $\vartheta_{Hi}^{\text{кон}}$ |
|-------|-------|------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|
| см    | См    | см         | см       | м/мин                         | м/мин                         |
| 1     | 2     | 3          | 4        | 5                             | 6                             |
| 0     | 5,2   | 2,2        | 7,18     | 484,7                         | 181,7                         |
| 1     | 6     | 3          | 5,26     | 355                           | 131,1                         |
| 2     | 6,6   | 3,6        | 4,39     | 296                           | 111,1                         |
| 3     | 7,2   | 4,2        | 3,76     | 253,8                         | 95,2                          |
| 4     | 7,5   | 4,5        | 3,51     | 237                           | 88,8                          |
| 5     | 7,8   | 4,8        | 3,29     | 222                           | 83,3                          |
| 6     | 7,9   | 4,9        | 3,22     | 217                           | 81,4                          |
| 7     | 7,95  | 4,95       | 3,19     | 215                           | 80,7                          |
| 8     | 7,95  | 4,95       | 3,19     | 215                           | 80,7                          |
| 9     | 7,9   | 4,9        | 3,22     | 217                           | 81,4                          |
| 10    | 7,8   | 4,8        | 3,29     | 222                           | 83,3                          |
| 11    | 7,5   | 4,5        | 3,51     | 237                           | 88,8                          |
| 12    | 7,2   | 4,2        | 3,76     | 253,8                         | 95,2                          |
| 13    | 6,6   | 3,6        | 4,39     | 296                           | 111,1                         |
| 14    | 6     | 3          | 5,26     | 355                           | 133,1                         |
| 15    | 5,2   | 2,2        | 7,18     | 484,7                         | 181,7                         |

На рисунке 4.3 и 4.4 показаны зависимости соответственно шага кулачка и скорости движения глазка раскладчика нити от величины перемещения последнего в осевом направлении мотальной паковки заданной формы.

На участках реверса шаг кулачка и скорость глазка раскладчика нити мгновенно возрастают от нуля до своего номинального значения.

Зависимости скорости раскладчика нити от величины его перемещения на участках реверса можно определить, воспользовавшись теоретическими зависимостями, выведенными для цилиндрического кулачка профессором А.Ф. Прошковым [73].



Рисунке 4.3 — Зависимость шага винтовой канавки раскладчика нити от его перемещения.

Поскольку:

$$\vartheta_H = \frac{\omega_k \cdot r_k^2 \cdot y_k}{\sqrt{R^2 - r_k^2 \cdot y_k^2}}, \quad (4.43)$$

где  $r_k$  – радиус цилиндрического кулачка раскладчика нити;

$R$  – радиус сопряженной окружности канавок кулачка;

$\omega_k$  – частота вращения кулачка раскладчика нити;

$\varphi_k$  – угол поворота кулачка раскладчика нити:

$$0 \leq \varphi_k \leq \frac{R \sin \alpha}{r_k} \quad (4.44)$$

$\alpha$  – угол конусности оправки, на котором формируется паковка.

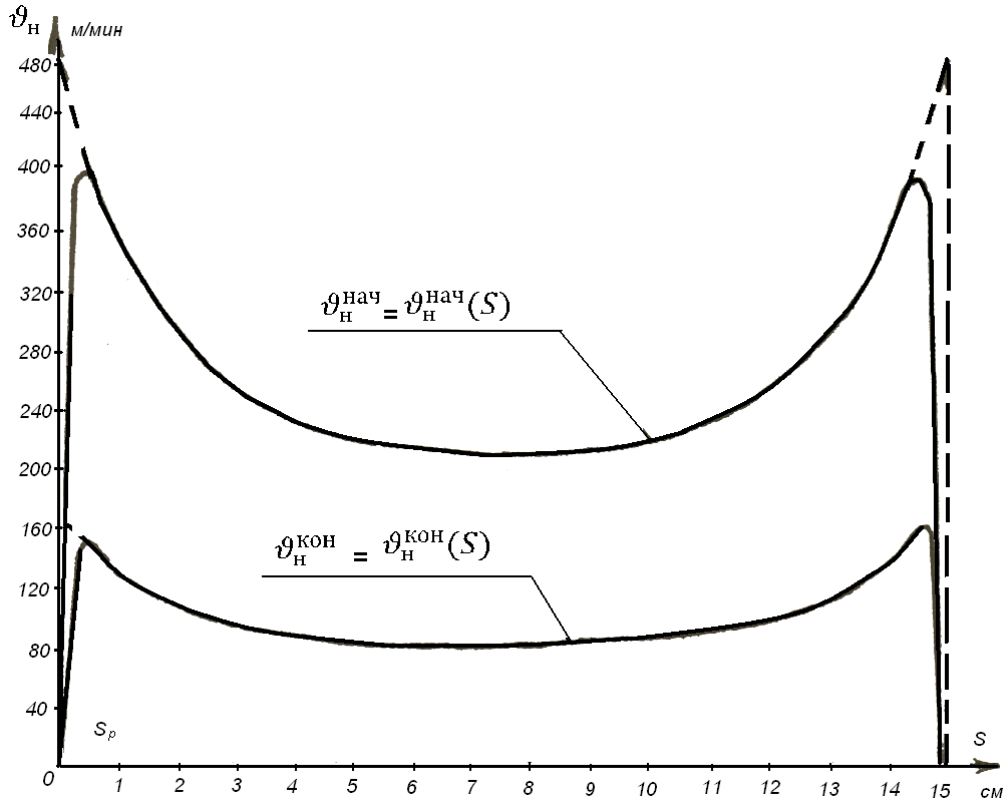


Рисунок 4.4 — Зависимость скорости глазка раскладчика нити от его перемещения.

Но так как

$$(S - R) = R^2 - r_k^2 \cdot \varphi_k^2 \text{ и } \varphi_k = \frac{\sqrt{2SR - S^2}}{r_k}, \quad (4.45)$$

то

$$v_{np} = \pm \frac{\omega_k r_k \sqrt{2SR - S^2}}{S - R} \quad (4.46)$$

Зависимости  $h_k = h_k(S)$  и  $v_n = v_n(S)$  на участках реверса раскладчика нити построены в предположении, что  $r_k = 2$  см;  $R = 0,5$  см.

На мотальной паковке, на участках реверса, могут возникать бугры из-за резкого увеличения линейной плотности раскладки нити  $P = \frac{2}{h_{ki} \cdot k}$ , поэтому

целесообразно сообщать кулачку раскладчика нити некоторое осевое перемещение или проектировать формирование на паковке сомкнутой структуры намотки (при симметричном законе движения раскладчика нити).

Для построения профиля канавок кулачка механизма раскладки нити необходимо знать зависимость перемещения глазка раскладчика нити от угла поворота кулачка.

Угол поворота кулачка раскладчика на  $i^{\text{тым}}$  участке может быть определён по формуле:

$$\Delta Y_{K_i} = 2\pi n_K \Delta t_i = \frac{2\pi n_K \Delta S_i}{v_{H_i}^{\text{cp}}} = \frac{2\pi \Delta S_i}{h_{K_i}^{\text{cp}}} (\text{рад}), \quad (4.47)$$

где  $n_K$  – частота вращения кулачка раскладчика нити;

$\Delta t_i$  – время раскладки нити на  $i$ -том участке.

Очевидно, что:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta S_i}{v_{H_i}^{\text{cp}}} (\text{мин}), \quad (4.48)$$

где  $\Delta S_i$  – длина  $i$ -го участка;

$v_{H_i}^{\text{cp}}$  – средняя скорость движения раскладчика нити на  $i$ -том участке, м/мин.

В рассмотренном случае:

$$\Delta S_1 = \Delta S_2 = \dots = \Delta S_n = \frac{H}{15} = \frac{15}{15} = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м};$$

а  $h_{K_i}^{\text{cp}}$  – рассчитан в сантиметрах, тогда:

$$\Delta Y_{K_i} = \frac{2\pi \cdot 0,01}{\frac{h_{K_i}^{\text{cp}}}{100}} = \frac{2\pi}{h_{K_i}^{\text{cp}}} (\text{рад})$$

Суммарный угол поворота кулачка раскладчика нити:

$$Y_{K_i} = \sum_{i=1}^i \Delta Y_{K_i}, \quad (4.49)$$

Очевидно, за ход раскладчика нити в одну сторону (вправо) кулачок повернется на угол:

$$Y_K = \pi k = \pi \cdot 8 = 25,12 \text{ рад}.$$

За один двойной ход раскладчик нити кулачок повернется на угол  $Y_{Kц} = 2\pi k = 50,24$  радиана.

Суммарное перемещение глазка раскладчика нити при раскладке нити на  $i$ -том участке:

$$S_i = S_{i-1} + \frac{h_{K_i}^{cp} \cdot \Delta Y_{K_i}}{2\pi} \quad (4.50)$$

Результаты расчетов  $\Delta Y_{K_i}$ ;  $Y_{K_i}$ ;  $S_i$ ;  $\frac{\beta_i^{нач}}{2}$  и  $\frac{\beta_i^{кон}}{2}$  приведены в таблице 4.2.

На рисунке 4.5 показана зависимость перемещения глазка раскладчика нити от угла поворота кулачка раскладчика нити, а на рисунке 4.6 развертка указанного кулачка.

Таблица 4.2

| $h_{k_i}^{cp}$ | $\Delta\varphi_{ki}$ | $\varphi_{ki}$ | $S_i$ | $\vartheta_{H_{нач}}^{cp}$ | $\vartheta_{H_{кон}}^{cp}$ | $\frac{\rho_i^{нач}}{2}$ | $\frac{\rho_i^{кон}}{2}$ |
|----------------|----------------------|----------------|-------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| см             | рад                  | рад            | См    | м/мин                      | м/мин                      | Рад                      | рад                      |
| 1              | 2                    | 3              | 4     | 5                          | 6                          | 7                        | 8                        |
| 6              | 1                    | 1              | 0,995 | 419,85                     | 157,4                      | 0,483                    | 0,269                    |
| 4,8            | 1,3                  | 2,3            | 1,95  | 325,5                      | 122,1                      | 0,386                    | 0,19                     |
| 4              | 1,54                 | 3,84           | 2,93  | 274,9                      | 103,15                     | 0,331                    | 0,149                    |
| 3,5            | 1,73                 | 5,57           | 3,89  | 245,4                      | 92                         | 0,298                    | 0,127                    |
| 3,3            | 1,85                 | 7,42           | 4,87  | 229,5                      | 86,05                      | 0,279                    | 0,116                    |
| 3,2            | 1,93                 | 9,35           | 5,85  | 219,5                      | 82,35                      | 0,268                    | 0,105                    |
| 3,18           | 1,96                 | 11,31          | 6,84  | 216                        | 81,05                      | 0,264                    | 0,102                    |
| 3,15           | 1,97                 | 13,28          | 7,83  | 215                        | 80,7                       | 0,269                    | 0,101                    |
| 3,18           | 1,96                 | 15,24          | 8,82  | 216                        | 82,35                      | 0,264                    | 0,102                    |
| 3,2            | 1,93                 | 17,17          | 9,81  | 219,5                      | 86,05                      | 0,268                    | 0,105                    |
| 3,3            | 1,85                 | 19,02          | 10,78 | 229,5                      | 92                         | 0,279                    | 0,116                    |
| 3,5            | 1,73                 | 20,75          | 11,74 | 245,4                      | 103,15                     | 0,298                    | 0,127                    |
| 4              | 1,54                 | 22,29          | 12,73 | 274,9                      | 122,1                      | 0,331                    | 0,149                    |
| 4,8            | 1,3                  | 23,59          | 13,72 | 325,5                      | 134,4                      | 0,386                    | 0,19                     |
| 6              | 1,1                  | 24,59          | 14,68 | 419,85                     | 157,4                      | 0,483                    | 0,269                    |

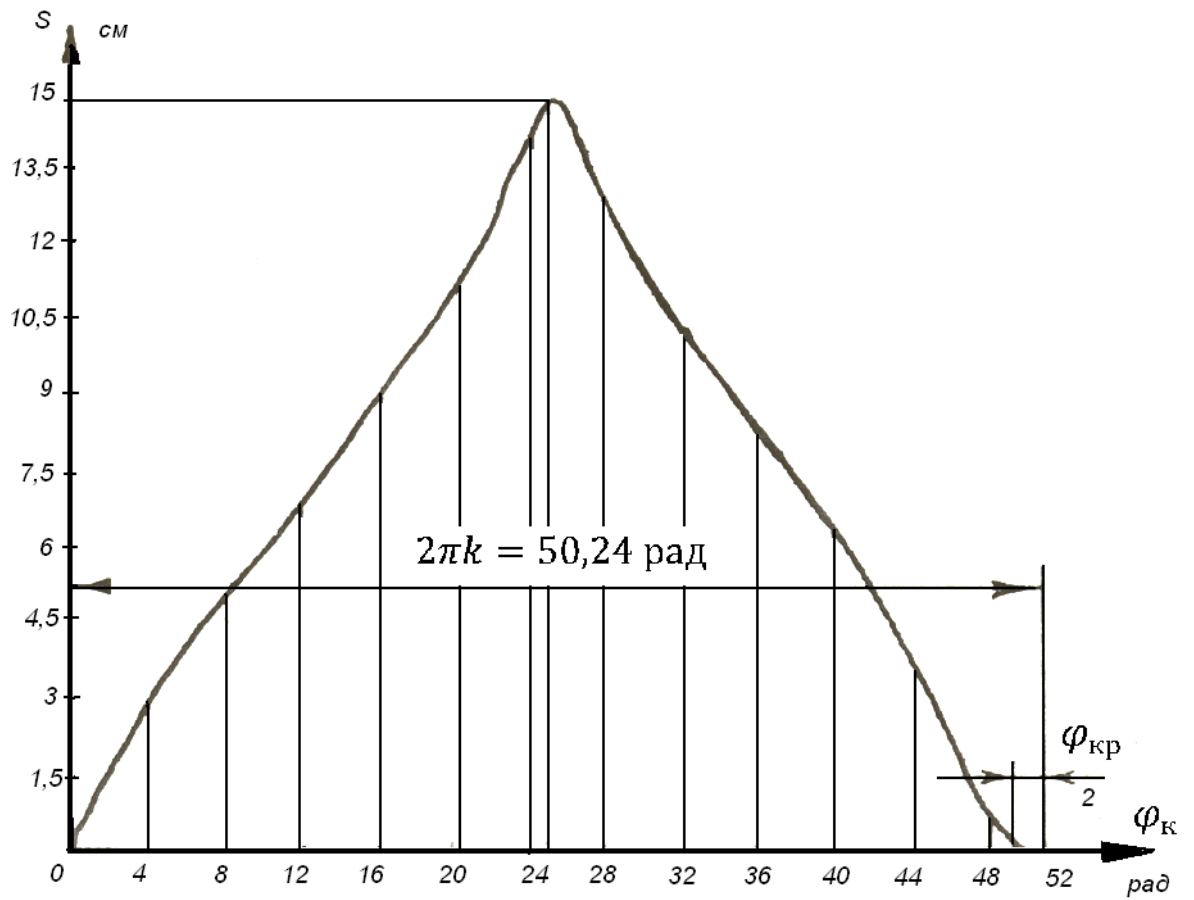


Рисунок 4.5 — Зависимость перемещения глазка раскладчика нити от угла его поворота.

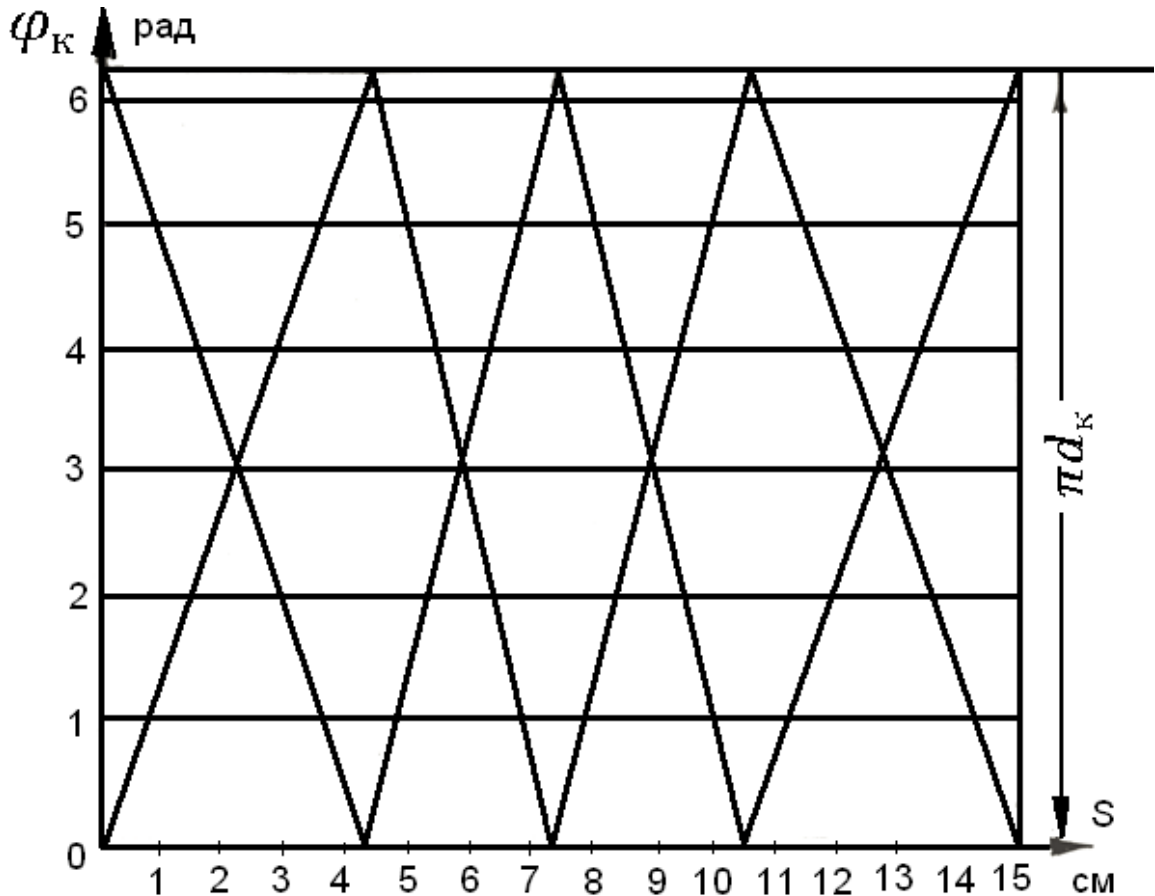


Рисунок 4.6 — Развёртка кулачка раскладчика нити.

Полный цикл движения раскладчика нити осуществляется за восемь оборотов кулачка ( $k=8$ ). У торцов формируемой паковки происходит изменение направления движения раскладчика нити и угол подъёма витков  $\beta_i$  уменьшается до нуля, а затем снова возрастает до своего номинального значения (рисунок 4.7).

При этом резко возрастает угол геодезического отношения  $\theta$  и может нарушаться первое условие равновесного положения крайних витков на поверхности намотки проф. А.П. Минакова («Условие формы»), что отмечается и в работе [74]

$$tg\theta = \frac{\frac{d}{ds}(R \cdot \cos \frac{\beta}{2})}{\cos^2 \frac{\beta}{2} - g \sin^2 \frac{\beta}{2}} \leq f_{max},$$

где:

$f_{max}$  — коэффициент трения витков о поверхность намотки;

$R$  – текущий радиус намотки.

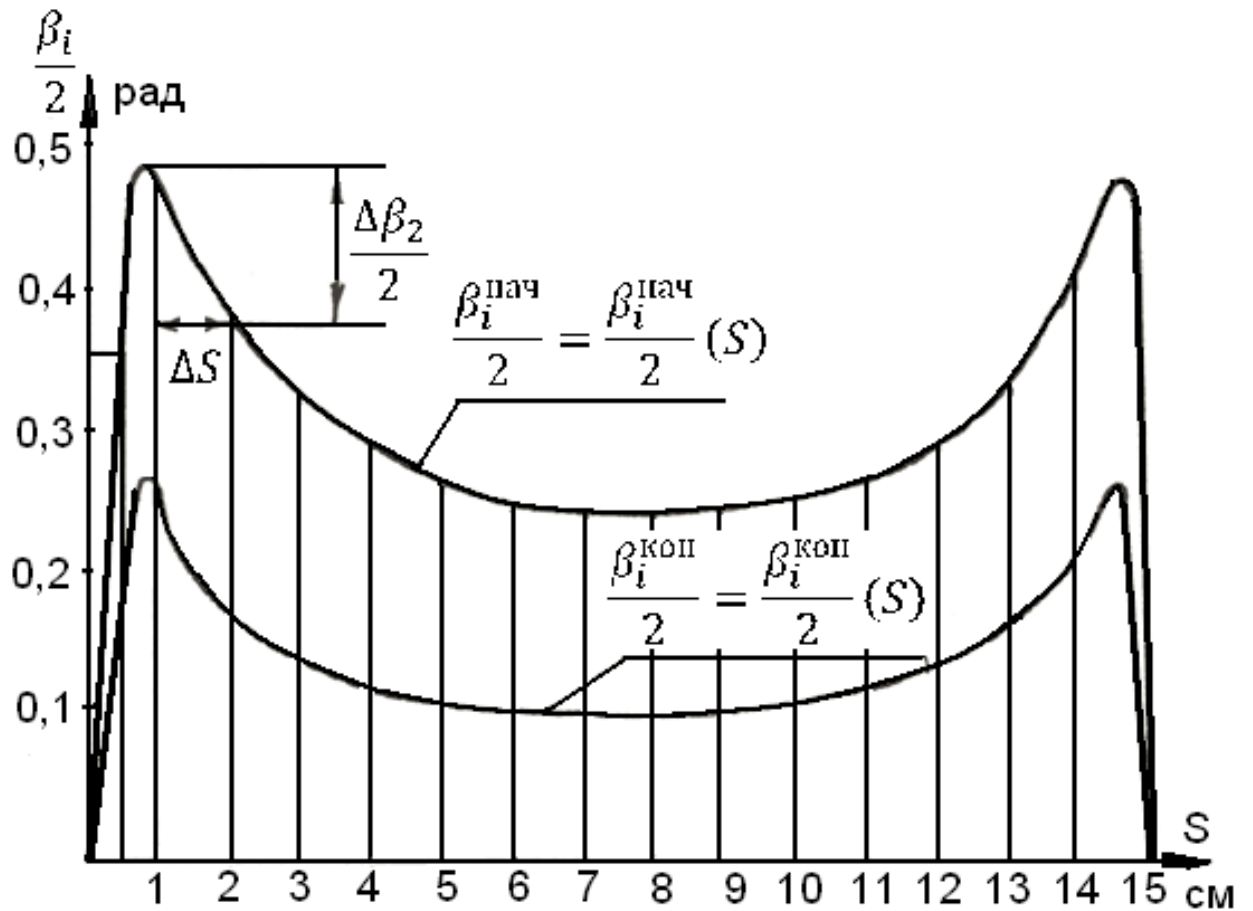


Рисунок 4.7 — Зависимость угла подъема витков от перемещения глазка раскладчика нити.

Учитывая, что:

$$g = \frac{\frac{R \cdot d^2 R}{dS^2}}{1 + \left(\frac{dR}{dS}\right)^2}, \quad (4.51)$$

Тогда:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{dR}{dS} \cos \frac{\beta}{2} - \sin \frac{\beta}{2} \left( \pm \frac{d\beta}{dS} \right) R}{\cos \frac{\beta}{2} - g \sin^2 \frac{\beta}{2}} \quad (4.52)$$

или

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{dR}{dS} - \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \left( \pm \frac{\Delta \beta}{\Delta S} \right) R}{\cos \frac{\beta}{2} - g \frac{\sin^2 \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}}} \quad (4.53)$$

Так, как в начале наматывания нити на паковку цилиндрической формы

$R = \text{const}$ , а  $\frac{dR}{dS} = 0$ ; и  $\frac{d^2R}{dS^2} = 0$ , поэтому:

$$tg\theta = \frac{tg\frac{\beta}{2}\left(\pm\frac{\Delta\beta}{\Delta S}\right)R}{\cos\frac{\beta}{2}} \quad (4.54)$$

При  $S=0$  имеем:  $\beta = 0$  и, следовательно,  $tg\theta_{\text{нач}} = 0$ .

При  $S=0,5$  см:

$$tg\theta_{\text{нач}} = \frac{\frac{-tg0,35}{2}\left(\frac{2 \cdot 0,35}{0,5}\right) \cdot 3}{\cos0,35} = -0,82.$$

При  $S=1$  см  $tg\theta = -0,716$ ;

При  $S=2$  см  $tg\theta = 0,128$ ;

При  $S=3$  см  $tg\theta = 0,06$ .

Итак, при перемещении раскладчика нити вправо угол геодезического отклонения постепенно уменьшается и при  $S=7,5$  см становится практически равным нулю, так как  $\Delta\beta = 0$ .

При дальнейшем перемещении глазка раскладчика нити  $tg\theta_{\text{нач}}$  меняет свой знак и постепенно возрастает, достигая максимума при  $S=15$  см.

В конце наматывания паковки на цилиндрическую оправку:  $\frac{dS}{dR} \neq 0$ .

Поскольку  $R = 0,8\sqrt{100 - (S - 7,5)^2}$ , то отношение, характеризующее кривизну поверхности намотки паковки составит:

$$\frac{dS}{dR} = \frac{6 - 0,8S}{\sqrt{100 - (S - 7,5)^2}}; \quad \frac{d^2R}{dS^2} = -\frac{80 \cdot R}{\sqrt{[100 - (S - 7,5)^2]^3}};$$

$$g = \frac{80 \cdot R}{\sqrt{[100 - (S - 7,5)^2]^3} + (6 - 0,8S)^2 \cdot \sqrt{100 - (S - 7,5)^2}}$$

Если  $S=0$ , то  $\beta = 0$

$$tg\theta_{\text{кон}} = \frac{dR}{dS} = \frac{6}{\sqrt{100 - (-7)^2}} = 0,9.$$

Если  $S=0,5$  см, то:

$$g = -\frac{80 \cdot 5,7}{\sqrt{[100 - (-7)^2]^3} + 5,6^2 \cdot \sqrt{100 - (-7)^2}} = -0,775.$$

$$tg\theta_{\text{кон}} = \frac{\frac{6 - 0,8 \cdot 0,5}{\sqrt{100 - (-7)^2}} - tg\frac{0,15}{2} \left( \frac{2 \cdot 0,15}{0,5} \right) \cdot 5,7}{\cos 0,15 + 0,775 \frac{\sin^2 \cdot 0,15}{\cos 0,15}} = 0,527.$$

Если  $S=1$  см, то  $g = -0,732;$   $tg\theta = 0,24.$

Если  $S=2$  см, то  $g = -0,688;$   $tg\theta = 0,637.$

Если  $S=3$  см, то  $g = -0,657;$   $tg\theta = 0,435.$

Очевидно, при  $S=7,5$  см угол геодезического отклонения достигает нулевого значения, а при дальнейшем увеличении  $S$  начинает возрастать по абсолютной величине, достигнув максимума  $\theta_{\text{max}}$  при  $H=15$  см.

При наматывании на паковку нитей различного сырьевого состава коэффициент трения скольжения их о поверхность намотки  $f_{\text{max}}$  составляет  $0,3 \dots 0,65$ .

Учитывая вышеизложенное, возникают серьёзные проблемы с формированием мотальных паковок заданной формы намотки, так-как  $tg\theta$  не должен быть больше  $f_{\text{max}}$  в любой момент формирования паковки.

Если паковку формировать, исходя из заданных условий равновесности витков намотки, то же всегда возможно получить заданную её форму. В рассмотренном выше примере витки намотки в конце её формирования и на торцах паковки находятся на грани срыва.

Таким образом, для повышения равновесности намотки (уменьшения  $tg\theta$ ) необходимо уменьшать кривизну образующей паковки и делать закон движения точки раскладки более равномерным (уменьшать величину  $\frac{dR}{dS}$ ).

При наматывании нити на цилиндрическую оправку кривизна образующей мотальной паковки постоянно увеличивается. На рисунке 4.8 показаны образующие паковки, соответствующие углам её поворота на  $1,4 \cdot 10^5$  радиан и  $6,35 \cdot 10^5$  радиан.

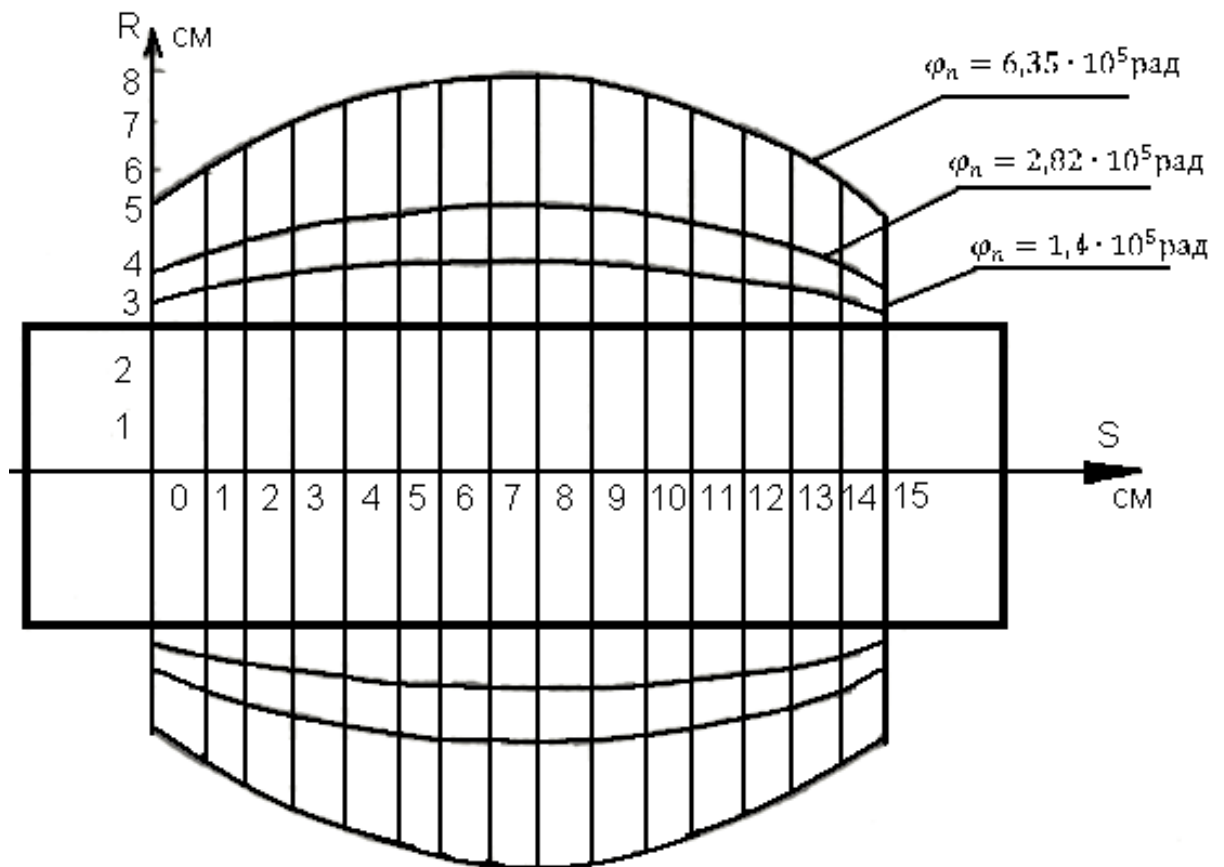


Рисунок 4.8 — Образующие паковки эллипсовидной формы намотки.

Проведенные расчеты и рисунок 4.8 показывают, что в начале наматывания паковки  $R = r_o$  и  $\frac{dR}{dS} = 0$ , а на величину угла геодезического отклонения наибольшее влияние оказывает неравномерность движения глазка раскладчика нитей.

В конце наматывания величина  $\frac{dR}{ds}$  довольно велика и оказывает существенное влияние на угол геодезического отклонения, т.е. на равновесность «сухой» намотки.

#### **4.4. Разработка конструкции и исследование механизма раскладки нити для формирования мотальных паковок заданной кривизны**

Из практики производства композитов известно, что при формировании прецизионных структур намотки мотальных паковок, с заданной кривизной поверхности, одной из основных проблем, является необходимость сохранения упорядоченного и равновесного расположения витков нити на поверхности формируемой паковки. Одной из причин неравновесности намотки, по нашему мнению, является постоянное изменение «свободного отрезка нити» - «С» (расстояния между глазком раскладчика нити и точкой входа нити в паковку). Влияние величины «свободного отрезка нити» на структуру намотки, форму и габариты формируемой паковки изучено довольно подробно, что отражено в работе [64]. Условия, необходимые для формирования мотальных паковок заданной кривизны поверхности подробно приведены выше, в разделе 4.3. Отметим, что существующие конструкции механизмов раскладки нити, выполняемые на основе, постоянства перемещения глазка раскладчика нити параллельно оси паковок, не позволяют формировать прецизионные структуры паковок заданной кривизны с постоянной толщиной (радиусом) их намотки. Учитывая влияние величины «свободного отрезка нити» на структуру намотки формируемых паковок, зарубежные конструкторы мотальных машин снабжают механизмы раскладки укатывающими роликами, с помощью которых, не только прессуется (уплотняется) намотка, но и фиксируется точка входа нити в паковку, что позволяет минимизировать влияние натяжения нити при перематывании на искажение (сокращение) высоты намотки паковок. Однако этим способом не

обеспечивается сохранение размеров паковки, потому что не устраняет влияние «свободного отрезка нити», а так же он не применим, при формировании прецизионных замкнутых (пористых) структур намотки. Особое значение данный вопрос приобретает при необходимости формирования паковок с нелинейной (переменной) кривизной поверхности, например, эллиптических конусов ракет. Применение цилиндрических прессующих валиков, в данном случае, затруднено, или просто невозможно. При этом величина «свободного отрезка нити» будет изменяться по высоте формируемой паковки, в зависимости от кривизны образующей, что приводит к существенным изменениям структуры намотки на различных её участках, а именно, изменениям угла сдвига витков  $\psi$  и угла скрещивания витков  $\beta$ , даже в одном слое намотки.

В данном случае происходит переуплотнение намотки на участках меньшего диаметра формируемой паковки и рассеивание витков (разуплотнение намотки) на участках большего диаметра, а получить паковку с равной толщиной стенки на различных участках её кривизны, практически невозможно.

Рассмотрим влияние «свободного отрезка нити» на структуру намотки в процессе формирования мотальных паковок.

Уменьшение высоты намотки мотальной паковки по сравнению с размахом глазка раскладчика нити определяется выражением:

$$v = 0,69C \frac{v_H}{v_0} \quad (4.55)$$

где:  $C$  – расстояние между линией движения глазка раскладчика нити и осью вращения паковки;

$v_H$  – скорость перемещения глазка раскладчика нити;

$v_0$  – окружная скорость наматывания нити на паковку.

Поскольку

$$\frac{v_H}{v_0} = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \quad (4.56)$$

то

$$b = 0,69 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \quad (4.57)$$

где:  $\beta$  - угол скрещивания витков.

Высота намотки бобины:

$$H = H_H - 2b = H_H - 1,38 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \quad (4.58)$$

Как видно из формулы (4.64), угол скрещивания витков  $\beta$ , так же зависит от расстояния “С” и он существенно уменьшается по мере приближения к торцам паковки. Проведенные исследования показывают, что при любом значении расстояния “С” наблюдается рассогласование движения точки наматывания (точки входа нити в паковку) с точкой раскладки (точкой, соответствующей траектории движения глазка раскладчика нити). В результате чего возникает искажение структуры намотки. Как показывают практические исследования, на искажение структуры намотки мотальной паковки влияет, не только величина «свободного отрезка нити», но и неравномерность натяжения нити, жесткость нити и т.д. Но, самое главное, с увеличением расстояния “С” рассогласование движение точки наматывания и точки раскладки возрастает, что приводит к нарушению структуры и формы намотки, поэтому, при проектировании механизмов раскладки нити, его следует сводить до минимума (1-2 мм).

Следует отметить, что действие большинства существующих механизмов раскладки нити, установленных на применяемом для армирования композиционных материалов мотальном оборудовании, основано на передаче возвратно-поступательного движения раскладчику нити вдоль образующих паковки, от прорезных пазовых кулачков. Для реализации задачи, по получению требуемой кривизны поверхности намотки, используются станки с ЧПУ и «копиры» механического (контактного), или оптического (бесконтактного) действия, что значительно усложняет конструкции мотального оборудования и снижает его производительность. Как показывает практика, применение

мотального оборудования с ЧПУ, так же не всегда предусматривает решение вопроса о минимизации величины «свободного отрезка нити» в приводах раскладчиков нити. Наиболее рациональным, по нашему мнению, путём минимизации влияния «свободного отрезка нити» является создание конструкций механизмов раскладки, обеспечивающих не только переносное движение раскладчика нити вдоль оси паковки, но при этом и поступательное, перпендикулярное к оси паковки, причем эквидистантное, относительно образующей формируемой намотки. То есть, такие механизмы должны обеспечивать движение раскладчика нити по сложной траектории, в соответствие с кривизной поверхности формируемых паковок.

Для реализации поставленной задачи разработан механизм раскладки нити, обеспечивающий формирования мотальных паковок заданной кривизны с постоянным, минимальным значением величины (1-2 мм) «свободного отрезка нити». Конструкция данного механизма обеспечивает заданное перемещение раскладчика нити в двух направлениях координатных осей  $OX$  и  $OY$ . На рисунке 4.9 показана схема механизма раскладки нити для формирования мотальных паковок заданной кривизны бесконтактным способом (вид сверху). На рисунке 4.10 показана схема механизма раскладки нити, для формирования мотальных паковок заданной кривизны (вид прямо).

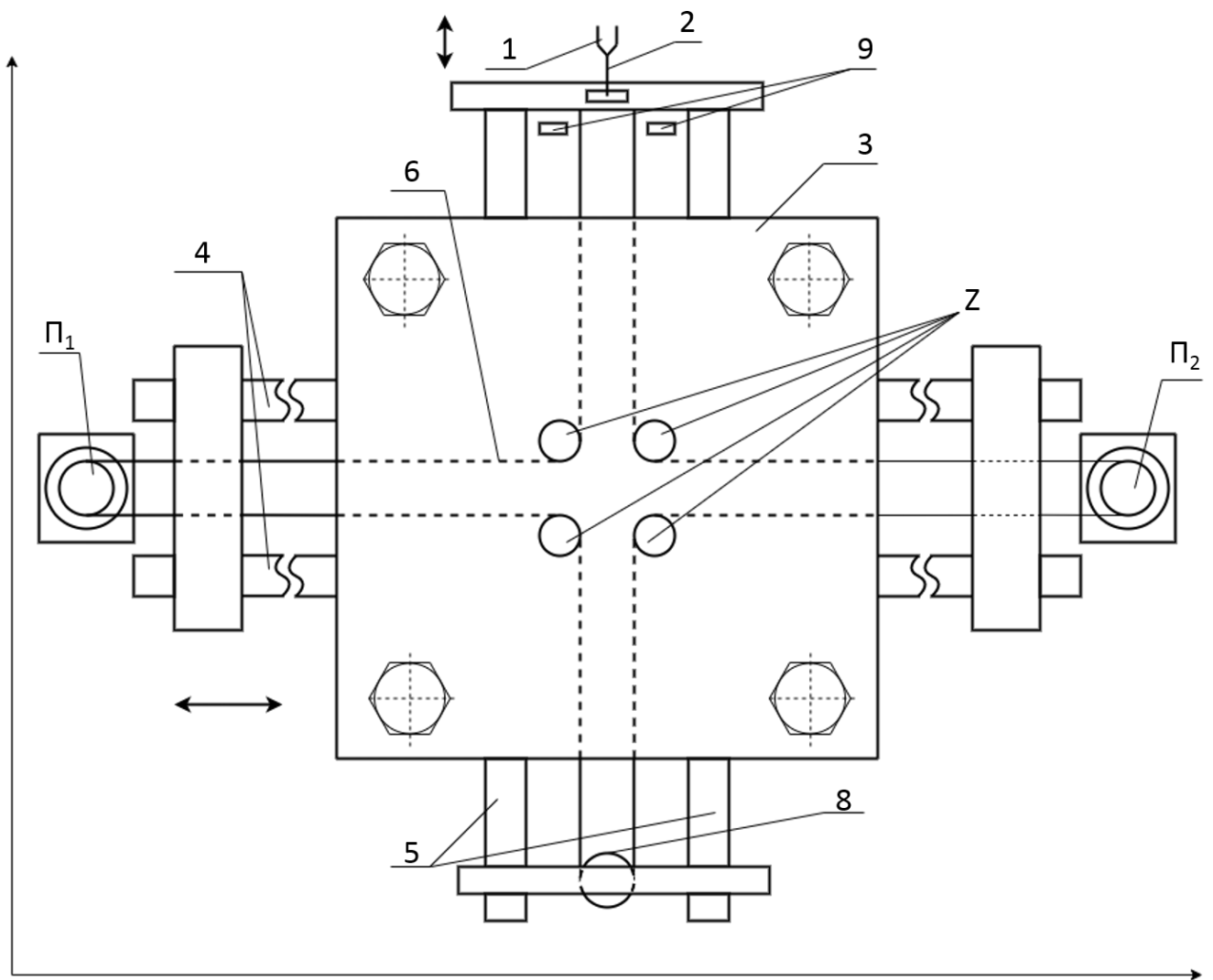


Рисунок 4.9 — Схема механизма раскладки нити для формирования мотальных паковок заданной кривизны бесконтактным способом (вид сверху).

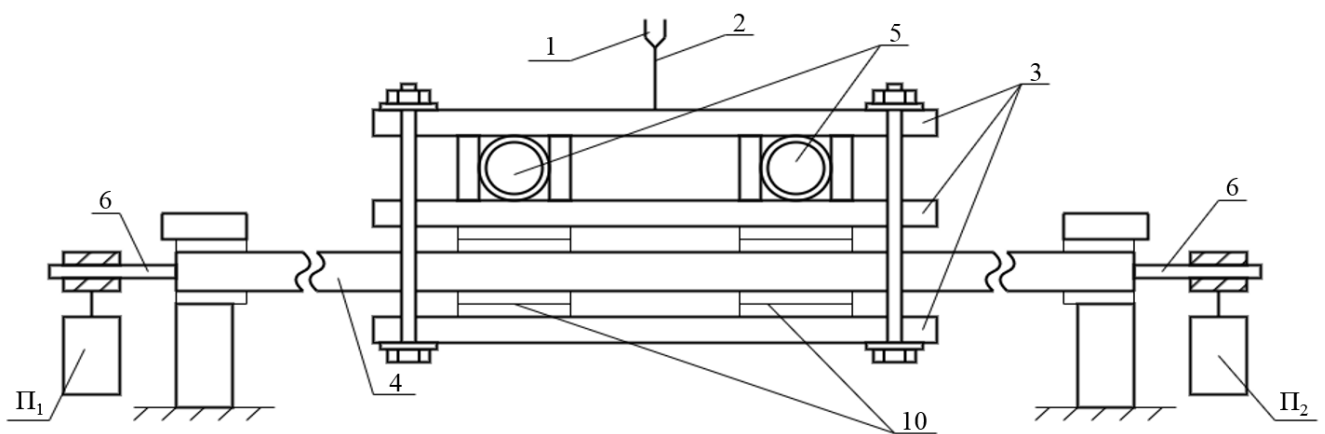


Рисунок 4.10 — Схема механизма раскладки нити для формирования мотальных паковок заданной кривизны бесконтактным способом (вид прямо).

На рисунке 4.9 показано, что глазок раскладчика нити 1 установлен на прутке 2, закрепленном на передвижной каретке 3, которая может перемещаться в двух направлениях одновременно: по направляющим валикам 4 вдоль оси паковки (по оси  $OX$ ) и по направляющим 5 перпендикулярно оси паковки (по оси  $OY$ ). Движение каретка 3 получает за счет перемещения зубчатого ремня 6, приводимого в движение двумя шаговыми двигателями  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , установленными на неподвижных опорах 11 и 12, через направляющие ролики 7 и поворотную звездочку 8.

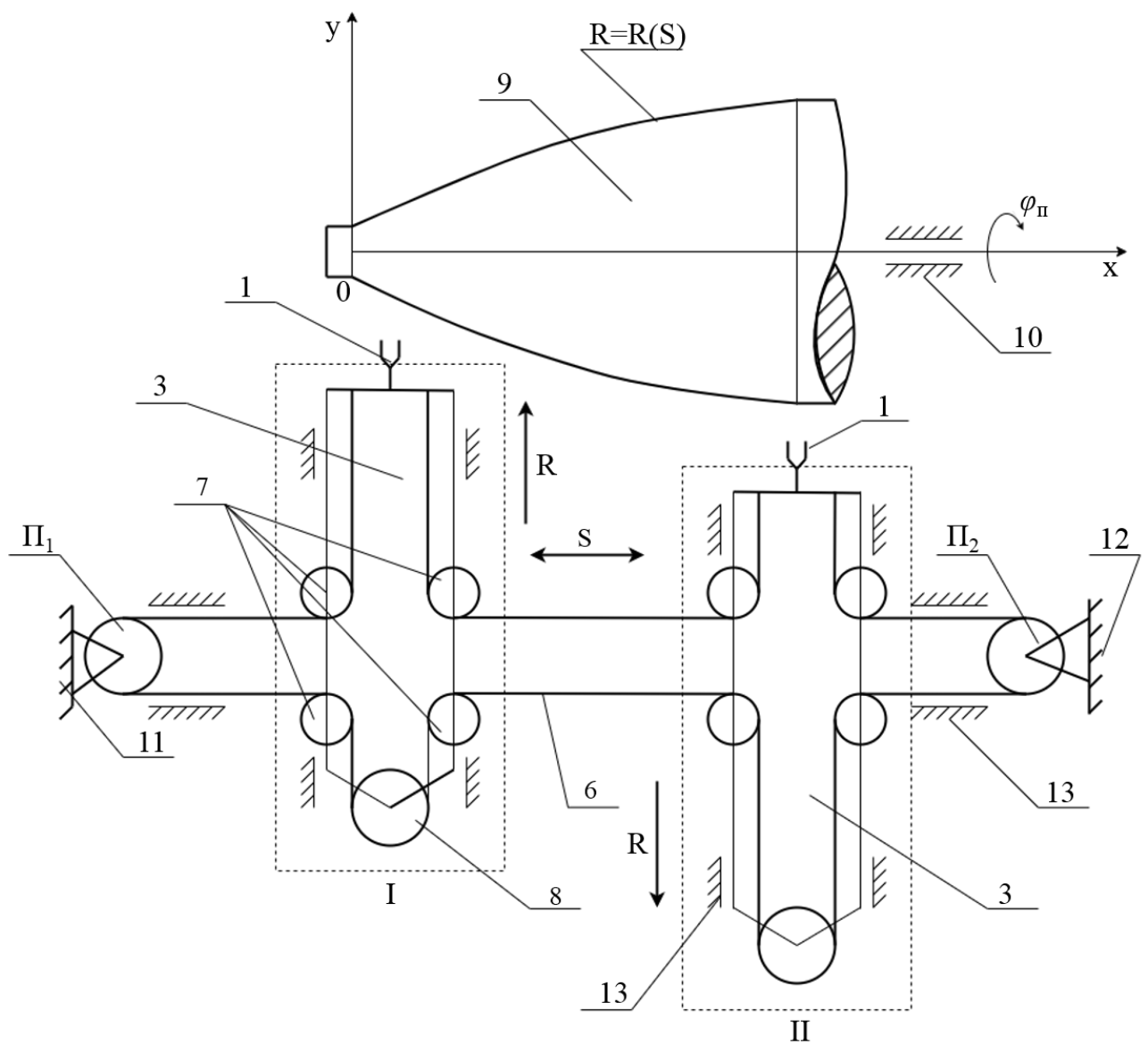


Рисунок 4.11 — Схема работы механизма раскладки нити вдоль образующей паковки заданной кривизны.

На рисунке 4.11 показана схема работы механизма раскладки нити вдоль образующей паковки 9 заданной кривизны  $R=R(S)$  установленной на оси 10. Зубчатый ремень 6, закрепленный на каретке 3, получая движение от шаговых двигателей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , установленных на неподвижных опорах 11 и 12, огибая направляющую звездочку 8, перемещается по направляющим 13. Подвижная каретка 3 с глазком раскладчика нити 1, перемещается, относительно образующей паковки, как в радиальном (осевом) направлении- $R$ , так и в переносном (параллельно оси паковки) направлении –  $S$ . Закон движения раскладчика нити задается в соответствие с формой намотки  $R=R(S)$ , по методике, изложенной в параграфе 3.2, путем изменения скоростей поступательного и переносного движения каретки 3 по направляющим 5 и 6, настройкой шаговых двигателей. Угол поворота паковки  $\varphi_n$ , при котором на ней сформируется намотка заданной формы, определяется выражением (4.24), полученным в параграфе 4.1.

Как показано на рисунке 4.11, при перемещении каретки с раскладчиком нити из положения I в положение II, глазок раскладчика нити всегда будет находиться на минимальном расстоянии от образующей паковки (на расстоянии 1-2мм) от поверхности паковки с кривизной  $R=R(S)$ . Исключая негативное влияние на структуру намотки «свободного отрезка нити»  $C$ .

## Выводы по главе 4

1. При армировании композиционных материалов намоточными структурами заданной формы и кривизны поверхности, необходимо учитывать закономерность движение раскладчика нити вдоль образующей паковки в течение всего процесса формирования заготовки, исключая, при этом, искажение формы

намотки, за счет изменения величины «свободного отрезка нити» между раскладчиком нити и точкой входа нити в паковку.

2. Форма намотки мотальных паковок определяется коэффициентом трения перематываемых нитей о поверхность паковки, т.е. значением угла геодезического отклонения витков и угла их скрещивания.

3. Разработана методика формирования мотальных паковок произвольной формы с положительной кривизной поверхности намотки на базе создания конструкции мотального механизма позволяющей изменять шаг раскладки нити (по требуемому закону) в зависимости от числа оборотов веретена.

4. Структура армирующих намоток, при создании композиционных материалов произвольной (заданной) формы, на участках паковки с большей толщиной намотки, должна иметь большую линейную плотность раскладки нити.

5. Для формирования мотальных паковок со стабильной структурой и произвольной формой намотки необходимо выполнение условия, когда для любого участка намотки, выбранного в направлении оси паковки, произведение толщины намотки на удельную плотность и осевую скорость перемещения нити является постоянной величиной.

6. Разработана конструкция мотального механизма, позволяющего формировать паковки положительной кривизны поверхности образующей, исключаяющего негативное влияние «свободного отрезка нити» на форму и размеры паковки.

## **Глава 5. Исследование процессов армирования композиционных материалов с помощью разверток намоток мотальных паковок**

Особое место в ряду технологий армирования толстостенных, высокопрочных композиционных материалов плоской и пространственной конструкций, следует выделить разверткам намоток мотальных паковок на плоскость. С помощью разверток прецизионных намоток можно получать новые плоские толстостенные конструкционные композиционные материалы, сопоставимые по своим качественным показателям с многослойными ткаными структурами, а по некоторым (например, по коэффициенту заполнения объема композита наполнителем), превосходить их. Построение разверток описано в работах [75,76]. Развертки 3D намоток на плоскость можно соотнести с многослойными ткаными структурами, т.к. они имеют заданные параметры (длина, ширина, толщина), из которых можно изготавливать композиционные материалы с разнообразными геометрическими формами и стабильностью размеров.

Кроме того, использование разверток позволяет сохранить прочностные свойства нитей, так как при намотке истирающее воздействие на нити минимально. Однако процесс формирования разверток намоток на плоскость мало изучен и требует выполнения ряда условий, которые рассмотрим ниже.

### **5.1. Исследование структур намотки мотальных паковок, используемых при армировании композиционных материалов с помощью их разверток на плоскость**

Развертки намоток мотальных паковок на плоскость дают наглядную картину взаимного расположения нитей в одном объёмном слое намотки, по которой можно определить и параметры всей структуры. Особенно важно применять развертки намоток на плоскость, при изучении взаимодействия витков намотки на процесс раскладки и проектировании новых структур армирования намоткой композиционных материалов [77,78]. Это позволяет расчетным путем определять многие параметры структур намоток, такие как пористость намотки, удельную плотность, коэффициент заполнения объёма композитов наполнителем (волокнистым материалом различного сырьевого состава), а так же определять коэффициент связности 3D намоток. Ранее, в разделе 2.6.3, были приведены методы построения разверток и разрезов структуры 3D намоток на плоскость, и показаны пути расчета числа перевивок («пересечек») нитей по анализу фронтальных проекций витков намотки базовой и перевивочной структур (синусоид). Однако число пересечений витков 3D намотки можно определять и пользуясь их развертками на плоскость.

На рисунках 2.8, 2.9, и 2.10 показаны развертки одно, 2х и 3х замкнутых намоток. Из данных рисунков видно, что у однозамкнутой намотки  $t = 4$ ; у двух замкнутой намотки  $t = 16$ ; а у 3х замкнутой намотки  $t = 32$  и т.д. То есть, число пересечений нитей  $t$  между собой в одном объёмном слое намотки, с ростом степени замыкания намотки  $p$ , увеличивается. При формировании 3D намоток, когда используется несколько систем нитей базовых и перевивочных структур,

интегрируемых одновременно в один объёмный слой, число «пересечек»  $t$  возрастет на число используемых систем нитей.

Таким образом, прочностные свойства (связность) структур 3D намотки, зависят от степени замыкания намотки  $p$  и числа систем нитей базовой и перевивочной структур. Чем выше эти показатели, тем прочнее будет структура 3D намотки, и она будет более устойчива к сдвигу и расслоению при внешних силовых воздействиях на неё.

Развертки намоток мотальных паковок можно использовать для изучения их структуры, но и непосредственно применять в качестве армирующих композиционные материалы наполнителей.

При проектировании отдельных элементов и цельных изделий из полимерных композиционных материалов, для замены ими металлов в конструкциях летательных аппаратов, учитывается расположение волокон в структуре наполнителя. Это связано с направлением действия внешних нагрузок, которые будет испытывать проектируемое изделие. Поэтому оно задается как исходной структурой волокнистого наполнителя, так и условиями получения композита с целью наиболее полной реализации механических свойств волокон в готовом материале или изделии, поскольку в армированных пластиках (волокнистых композитах) фактически «работают» отдельные волокна, находящиеся в матрице. Использование разверток намотки мотальных паковок различных структур позволяет проектировать гетерофазные композиции, структура которых может быть оптимизирована по отношению к характеру и величине внешних воздействий и сконструирована с требуемым уровнем анизотропии свойств.

Как отмечалось ранее, в разделе 1, традиционные способы армирования композиционных материалов основываются на использовании текстильных наполнителей в виде волокон, нетканых полотен, тканей, трикотажа, намоток. Все перечисленные способы, в зависимости от структур армирующих наполнителей,

имеют свои, присущие только им свойства и качественные параметры, определяющие области их применения.

Если для изготовления силовых и особо ответственных конструкций требуется автоклав, то средне- и мало нагруженные конструкции могут изготавливаться способом вакуумного формования в термопечах, или на обогреваемой оснастке.

Листовые композиционные материалы, представляют собой нетканые полотна или ткани из коротких и непрерывных волокон, пропитанных термопластичными смолами. Раскладывая в форму выкроенные заготовки таких материалов в виде многослойного пакета, и проводя отверждение при повышенном давлении и температуре в автоклаве, получают готовое изделие методом автоклавного формования.

Для расширения ассортимента таких изделий целесообразно применять новый способ армирования конструкций (заготовок) композиционных материалов, используя развертки на плоскость намоток мотальных паковок различных 3D структур, требуемой (задаваемой) толщины и формы. Особое значение этот способ армирования приобретает при изготовлении изделий большой толщины и заданного профиля, (плоских, или заданной кривизны поверхности). Разверткой 3D намоток различных структур, могут формироваться, не только плоские листовые армирующие элементы композиционных материалов, но и профильные конструкции, с заданной кривизной поверхности и формы, что делает развертку намоток перспективным технологическим процессом создания композитов большой толщины и сложных форм.

## 5.2. Особенности расчёта раскроя для выкладки развёрток намотки цилиндрической и конической формы

Намотка нитей на цилиндрические паковки является самой простой и распространенной технологией формирования мотальных паковок. Следует отметить, что раскладка витков нитей (волокон), на цилиндрических поверхностях оправок (паковок), происходит по винтовым спиралям, но не по спиральям, как это представляется в некоторой технической литературе [58], (откуда и пошло название «спиральные», намотки и т.д.). Все они являются «крестовыми», так как витки нитей (жгутов) пересекаются друг с другом под углом  $\beta$ , а у спиралей нет, для них  $\beta = 0$ , и такие намотки относятся к параллельным.

На развертках цилиндрических намоток витки нитей располагаются по прямым линиям, как это было уже показано на рисунках 2.4. а) и 2.4. б), а их расположение определяется выбранной структурой и степенью замыкания намотки  $p$ . Развертка цилиндрической намотки представляет собой прямоугольник рисунок 5.1 а), высота которого равна  $L = \pi D$ , где  $D$ -текущий диаметр намотки, а ширина равна высоте паковки -  $H$ . Из рисунка 5.1. б), где показан фрагмент многослойной намотки видно, что при такой намотке диаметр намотки будет переменной величиной и изменяться в пределах от  $D_0$  до  $D_n$ , где соответственно  $D_0$ -диаметр оправки, а  $D_n$  - наружный диаметр намотки. Данное обстоятельство приводит к тому, что при разворачивании намотки на плоскость, наружные слои намотки по дуге  $AA$  будут сжиматься, а внутренние по дуге  $BB$  растягиваться. Неизмененными по размерам останутся витки так называемого нейтрального слоя намотки  $NN$ , расположенные приблизительно посередине толщины намотки -  $S$ . Учитывая данное положение расчет размеров разверток, предназначенных к выкладке в качестве армирующих заготовок, следует производить по нейтральному слою намотки  $NN$ . Брать за расчетные значения размеров намотки диаметры  $D_0$  и  $D_n$ ,

нельзя, так как в первом случае величина  $L$  окажется излишне большой, а во втором - недостаточной.

Из рисунка 5.1. б) следует, что:

$$L = \pi(D_n - S) \text{ или } L = \pi(D_0 + S) \quad (5.1)$$

Приведенный расчет предполагает, что толщина намотки  $S$  очень мала по сравнению с диаметром оправки  $D_0$  или радиусом изгиба –  $R$ . В теории машиностроения данное отношение выражается условием:  $S < \frac{1}{20}R$ . [80].

В текстильном материаловедении данное соотношение не предусмотрено, но для снижения внутренних напряжений на волокна наружных слоев (снижения вероятности их разрушения), при создании разверток большой толщины  $S$ , расчет длины заготовки  $L$  следует производить не по длине дуги нейтрального слоя намотки  $NN$ , а по линии, проходящей ближе к внутреннему слою  $BB$ , так как смещение витков наружных слоев намотки будет происходить в ту же сторону. Очевидно, что расположение витков нити (волокон) в объеме развертки будет зависеть от вида сырья, из которого сформирована нить, и от структуры намотки мотальной паковки (удельной плотности намотки). Чем плотнее структура намотки и чем выше жесткость нити, тем сложнее получить равномерную по структуре развертку намотки на плоскости. Поэтому, при проектировании толстостенных армирующих заготовок, создаваемых на базе разверток, следует предусматривать максимально большой диаметр оправок  $D_0$ .

Особый интерес представляет собой способ создания цельных плоских армирующих заготовок заданной формы, что выполняется с помощью построения фигур, образующихся при сечении разверток намоток плоскостями, проходящими под заданным углом наклона к оси паковки, как показано на рисунке 5.2, где изображена схема построения развертки усеченного кругового цилиндра.

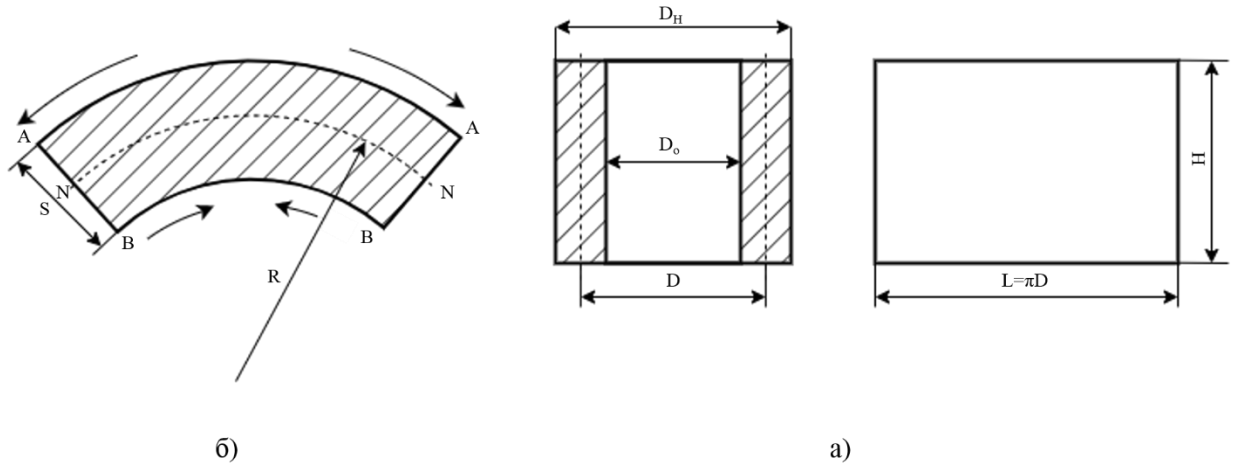


Рисунок 5.1 — а) Развертка цилиндрической намотки толщиной; б) Фрагмент развертки многослойной намотки толщиной  $S$

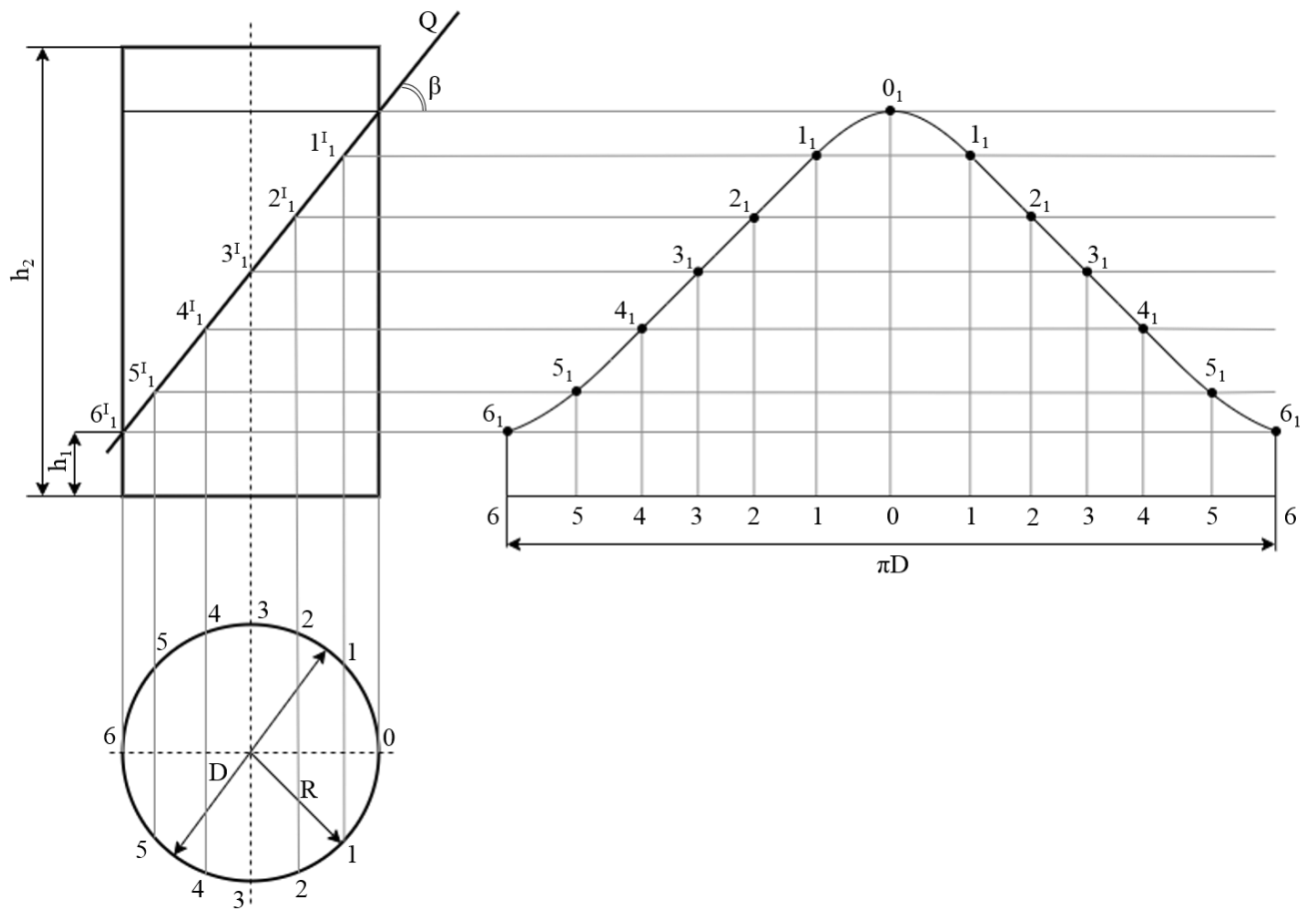


Рисунок 5.2 — Схема построения развертки усеченного кругового цилиндра.

Ранее, в разделе 2,5. было показано, что получить намоткой нитей на оправку заданной формы требуемую 3D структуру, можно задавая главный параметр работы мотального механизма, а именно величины передаточного отношения от раскладчиков нити к паковке -  $i_o$ , при которых на ней будут формироваться заданные базовая и перевивочные намотки, (с учетом введения в расчеты необходимых значений параметров:  $\beta$ ;  $P$ ;  $Z$ ). Данные параметры должны обеспечивать требуемое значение суммарного угла сдвига витков  $\Psi_{1,p+1}$  между витками различных пар слоев намотки.

Расчет  $i_o$  проводится по формуле (2.6).

Суть построения развертки и конструирование заданной формы армирующих компонентов композиционных изделий заданной формы покажем на конкретном примере, показанном на рисунке 5.2.

Пусть требуется получить плоскую армирующую заготовку, максимально заполненную волокнистым материалом:

- 1) Прямоугольной формы размерами  $h_2 \times L$ ;
- 2) Одна из сторон  $L$  прямоугольника должна иметь синусоидальную форму, период которой равен  $\pi D$  и амплитудой  $A$ ;
- 3) Основанием синусоиды должен быть прямоугольник высотой  $h_1$ , а вершиной  $h_2$ .

Исходя из условия 1, поставленной задачи, для ее решения используем за базу - мотальную паковку высотой раскладки нитей на паковке  $H$ . Сформируем цилиндрическую паковку сомкнутой структуры 3D намотки на оправке диаметром  $D$ . На образующих намотки мотальной паковки, расположенных под  $180^\circ$  относительно друг друга, отложим от основания, соответственно высоты  $h_1$  и  $h_2$ . Через полученные точки проведем секущую плоскость  $Q$ , которая пройдет под углом  $\beta$  к основанию цилиндра. Для построения криволинейных участков синусоиды окружность основания цилиндра разбиваем на равное число частей (на рисунке 5.2 на 12 частей), точки деления, сносая на фронтальную проекцию, основания и проводят соответствующие образующие цилиндра  $1^1 - 1_1^1$ ;  $2^1 - 2_1^1$ , и т.д.

разбивают на равные 12 частей длину образующей  $L = \pi D$  и из точек деления восстанавливают перпендикуляры, которые определяют положение образующих на развертке цилиндра. Далее откладывают на них отрезки, длины которых определяются на фронтальной проекции, путем переноса точек  $1_1^I$ ;  $2_1^I$  и т.д. На развертке получают точки 1; 2; 3 и т.д. Данные точки соединяют плавной кривой, и получают заданную линию, ограничивающую развертку по синусоидальной кривой. Период синусоиды равен длине окружности основания  $\pi D$ , а высота прямоугольника под синусоидой имеет высоту  $h_1$ . Таким образом, с помощью усеченного цилиндра, построена развертка намотки заданных параметров.

Намотки мотальных паков конической формы могут быть использованы для построения плоских армирующих заготовок (преформ) сложной «кругообразной» формы, путем развертки их на плоскость. Так, развертка прямого кругового конуса, показанная на рисунке 5.3. а) представляет собой сектор круга (рисунок 5.3. б), радиус которого  $R$  равен длине образующей конуса, длина дуги  $l$  равна длине окружности основания конуса  $\pi D$ .

По заданным размерам проектируемой заготовки  $R$  и  $l$  (задается высота и радиус сектора заготовки), легко построить развертку фигуры такой заготовки (рисунок 5.3 б).

Из рисунка 5.3. б) видно, что:

$$R = \sqrt{\frac{D^2}{2} + H^2} \quad (5.2)$$

$$a \ l = \pi D \quad (5.3)$$

В качестве исходных данных, при проектировании плоских круговых тел (заготовок) может быть задан «центральный угол развертки», который определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{180}{R} D \quad (5.4)$$

Чаще всего, в качестве базовых конических поверхностей, выступают мотальные паковки в виде усеченного конуса, форма и развертка которых показаны, соответственно на рисунке 5.4 б).

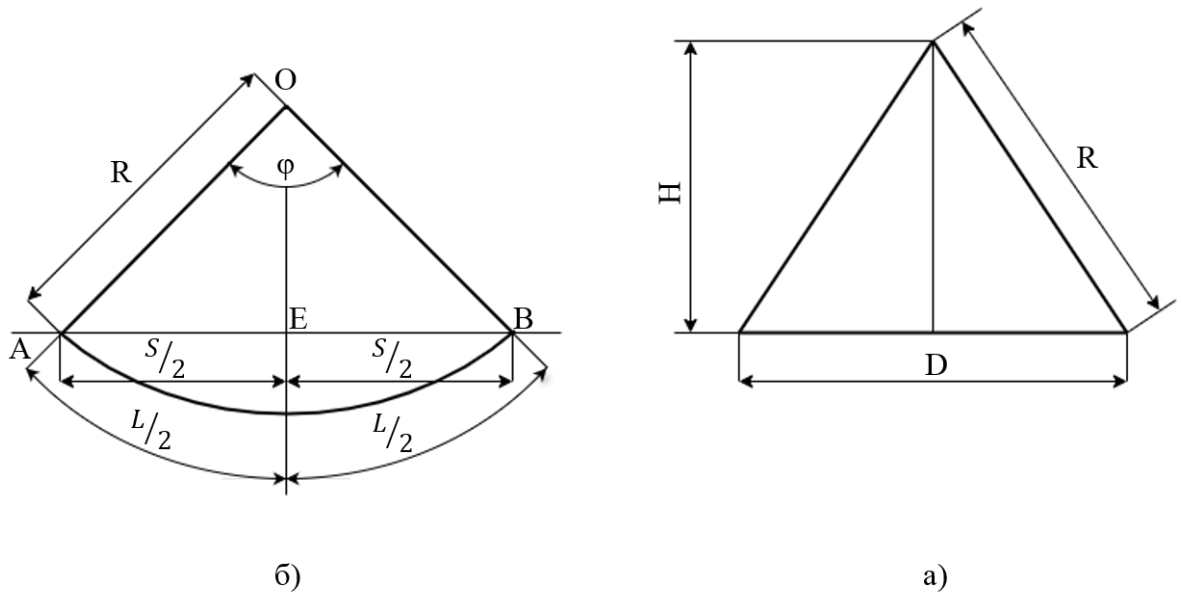


Рисунок 5.3 — а) Прямой круговой конус; б) развертка кругового конуса.

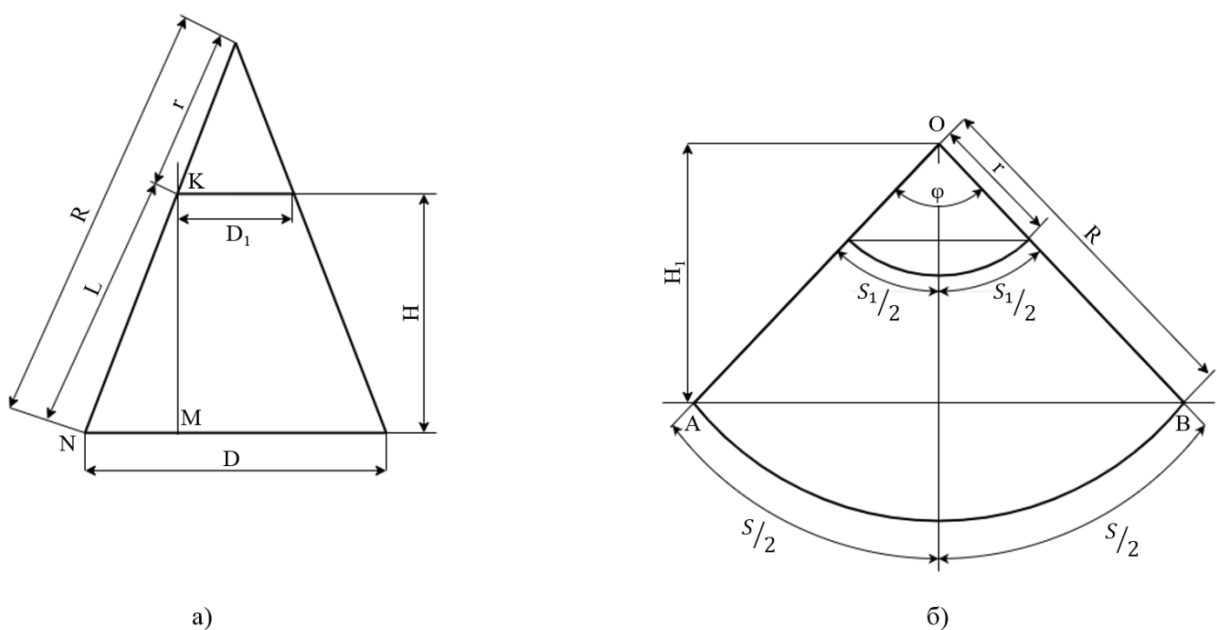


Рисунок 5.4 — а) Усеченный конус; б) развертка усеченного конуса.

Из рисунка 5.4 а), длина образующей усеченного конуса будет:

$$L = \sqrt{H + \frac{(D-D_1)^2}{2}} \quad (5.5)$$

Из подобия треугольников MNK и NOO<sub>1</sub> следует, что

$$R = \frac{LD}{D-D_1} \quad (5.6)$$

Из рисунка 5.3 а) так же видно, что:

$$R = L \quad (5.7)$$

Методы построения разверток цилиндров, конусов, призм и других профильных тел, имеющих ось вращения, подробно описаны в технической литературе [81]. Однако, приведенные выше базовые расчеты разверток намоток, сделаны для того, чтобы при проектировании профильных заготовок композитов плоской формы, было проще и удобнее определять расположение волокон (нитей) в структуре намотки армирующих заготовок, при задаваемых значениях угла скрещивания витков  $\beta$ .

Многообразие геометрических форм тел, имеющих ось вращения, на базе которых возможно формировать намотки различных структур, а, следовательно, и их развертки, позволяет оптимизировать раскладку армирующих волокон в готовом изделии с известным значением угла скрещивания витков  $\beta$ , по отношению величине и направлениям внешних воздействий, с требуемым уровнем анизотропии свойств.

Построение разверток сложного профиля и фигур раскроя, можно выполнять путем сечения цилиндрических или конических намоток не одной, а несколькими секущими плоскостями, расположенными под требуемыми углами к оси паковки. При этом базовые паковки (оправки) могут иметь различные размеры и форму.

### **5.3. Исследование прочностных характеристик армирующих структур, формируемых на базе намоток мотальных паковок с помощью разверток**

Ряд композиционных материалов применяемых, в авиа и автомобилестроении могут армироваться на базе намоток мотальных паковок различного назначения, т.е. являются телами вращения. Данные материалы, - оболочки, оплётки оправок, армированные шланги, работающие под давлением, чередующиеся многослойные структуры из оплеток, намоток и тканей относятся к анизотропным материалам. Их конструкции предназначены, чаще всего, для преодоления внутренних или внешних силовых воздействий и придания изделиям дополнительной прочности.

К таким композитным материалам также относятся многослойные, неоднородные по структуре, резинотекстильные изделия (оплётки или намотки армированных рукавных шлангов) рисунок 5.5. При расчёте прочности таких изделий необходимо учитывать направление внутренних или внешних усилий, прилагаемых к конечным изделиям во время их работы, и непосредственно к нитям (волокнам), составляющим армирующую оплётку (намотку), на которые приходится приложение внешней нагрузки [82].

Качественные показатели таких конечных изделий и их прочностные характеристики имеют важное значение, но ввиду сложности конструкции при многослойной структуре, они трудно поддаются расчёту. Поэтому изыскание способов упрощения прочностных расчётов композитов армированных намоткой нитей (жгутов), является актуальной задачей, решить которую можно с использованием развёрток намотки мотальных паковок.

В работе [58], отмечается, что в напорных рукавах с тканевыми прокладками, расположенными под углом  $45^0$  к их оси, распределение внутреннего давления

будет более равномерным и это обусловлено смещением нитей каркаса до момента совпадения с направлением внутренних сил в каркасе вызываемых воздействием потока жидкости. В работе [83] отмечается, что при проектировании композиционных материалов можно заранее заложить наиболее рациональное направление расположения армирующих нитей каркаса, соответствующее более устойчивому к внешним воздействиям состоянию его структуры.

Проверим данные выводы на наглядном примере расчетом прочностных свойств армирования двухслойного рукава, общий вид которого показан на Рисунке 5.5. А на рисунке 5.6. показана развёртка и расположение армирующих нитей в структуре двухслойного рукава.

Действительно, взаимное расположение армирующих нитей в структуре одного объёмного слоя намотки, определяется углом скрещивания витков  $\beta$ , рисунок 5.8, а при многослойной структуре взаимное расположение нитей в смежных слоях будет изменяться, (с учётом изменения уменьшения угла скрещивания витков  $\beta$ ). Следовательно, будет происходить и перераспределение давления между витками нитей различных слоев намотки. При этом необходимо принимать во внимание то обстоятельство, что каждый последующий слой армирующей намотки композиционного материала, будет воспринимать меньшую нагрузку (направляемую на него от внутреннего или внешнего воздействия) по сравнению с предыдущим.

Для определения нагрузок, приходящихся на армирующие нити, оказывающие сопротивления разрыву рукава под воздействием внутреннего гидравлического давления  $Q$  (кг/см<sup>2</sup>), рассмотрим элемент рукава, рисунок 5.7 и развёртку намотки элемента рукава на отрезке одного шага намотки  $h$ , рисунок 5.8.

Из рисунка 5.7 видим, что давление,  $Q$  приходящееся на площадь прямоугольника  $AA'BB'$ , которая является проекцией двух полуцилиндров на горизонтальную плоскость можно определить из выражения:

$$Q = 2 h P_y , \quad (5.8)$$

где  $P$  – внутреннее гидравлическое давление (кгс/см<sup>2</sup>),

Давление  $Q$  вызывает тангенциальную нагрузку на паковку  $P_y$  (кгс/см<sup>2</sup>) и  $P_x$  (кгс/см<sup>2</sup>) по всей длине рукава, поэтому в общем случае можно записать:

$$P_y = \frac{2LP_r}{2L} = P_r \quad (5.9)$$

Осевая нагрузка на стенки рукава (намотки) радиуса –  $r$  составляет:

$$P_\phi = \frac{P\pi r^2}{2\pi r} = 0,5Pr \quad (5.10)$$

Из формул 5.9 и 5.10 видно, что осевая нагрузка, приходящаяся на элемент рукава вдвое меньше тангенциальной, но следует отметить, что такое распределение нагрузок характерно только для тонкостенных изотропных материалов (оболочек), находящихся под воздействием внутреннего давления. Для многослойных, неоднородных по структуре и сырьевому составу текстильных армирующих материалов наполнителей композитов, такое соотношение осевой и радиальной нагрузок соблюдается не всегда. Так при расчёте прочности анизотропных материалов (намоток, оплётков), следует учитывать направление усилий, по отношению к составляющим их элементам (расположению нитей в структуре намотки и т.д.).

Очевидно, что при формировании армирующих заготовок композиционных материалов (намоткой), можно заранее установить наиболее рациональное расположение нитей в армирующей структуре паковки, путем расчета значения угла скрещивания витков  $\beta$ , при котором разрушающие воздействия на намотку со стороны внешних прилагаемых усилий будут минимальными. При этом армирующая намотка, а, следовательно, и само изделие, будут иметь равнопрочную структуру, как в осевом, так и в радиальном направлениях паковки. Покажем это, рассмотрев развёртку замкнутой намотки цилиндрического рукава диаметром  $D$ , рисунок 5.8.

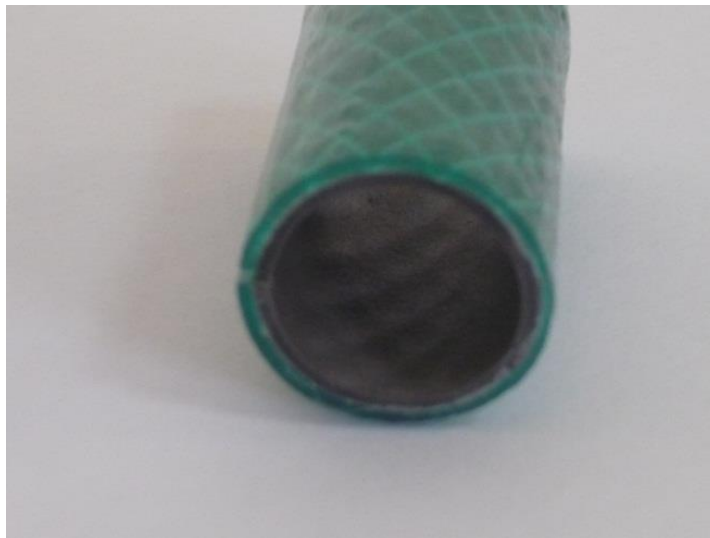


Рисунок 5.5 — Общий вид 2-х слойного рукава армированного двухзамкнутой намоткой.

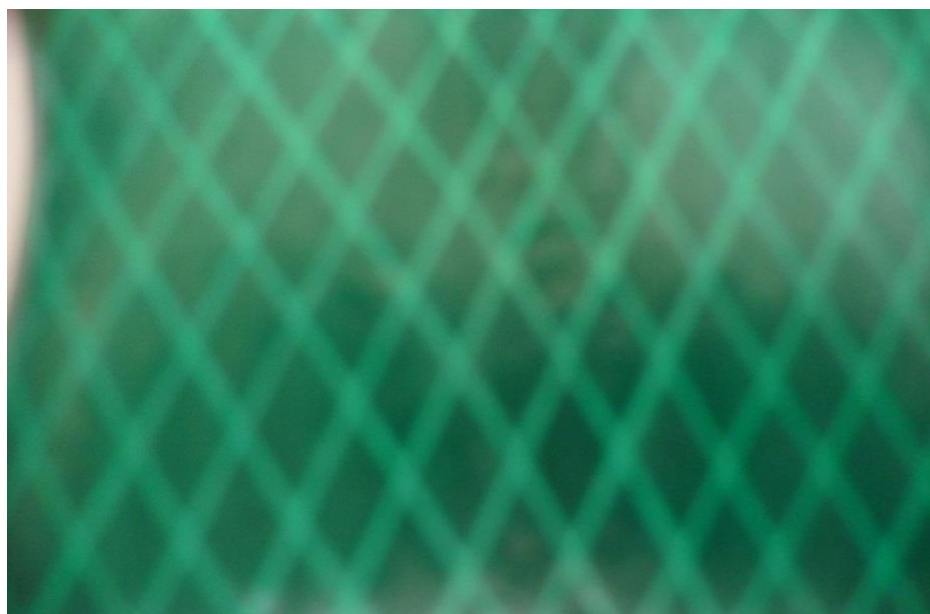


Рисунок 5.6 — Развёртка и расположение армирующих нитей в структуре двухслойного рукава.

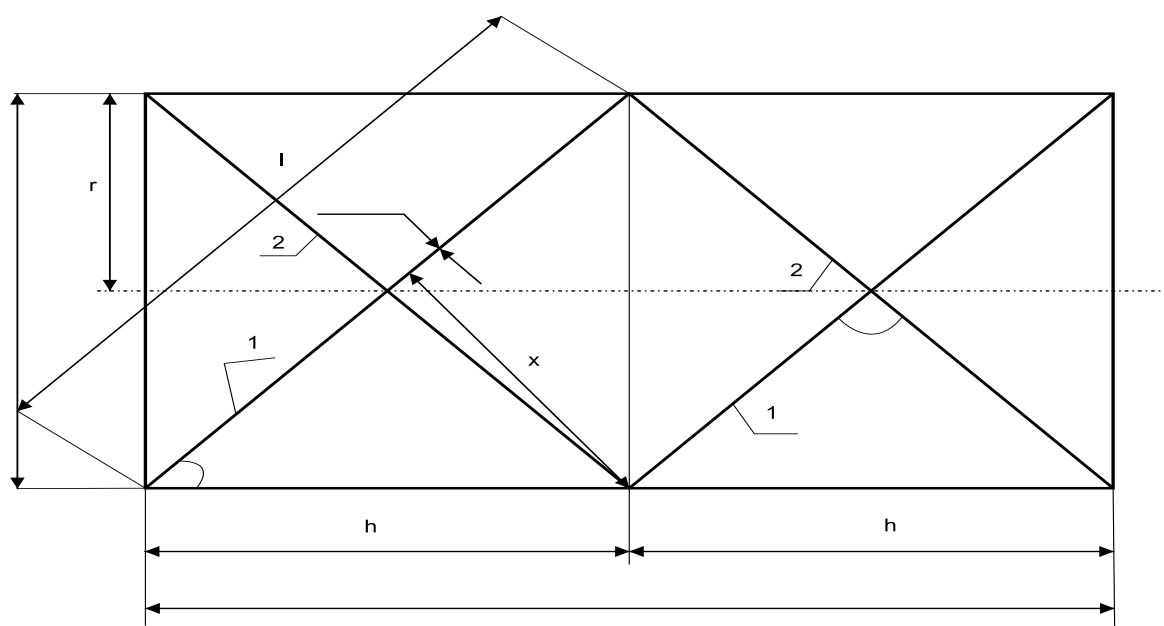
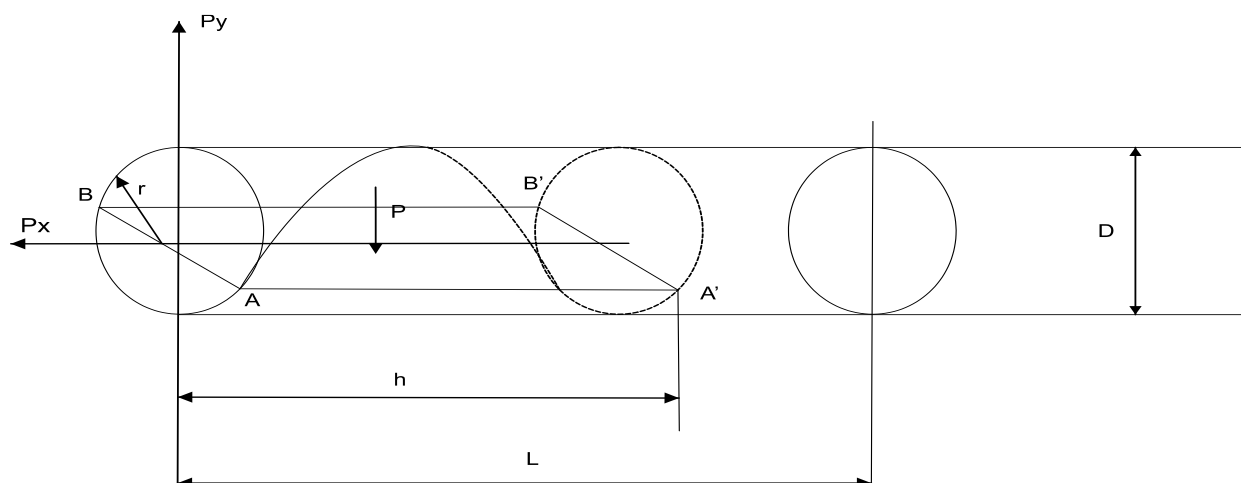


Рисунок 5.7 — Элемент рукава армированного намоткой нити.

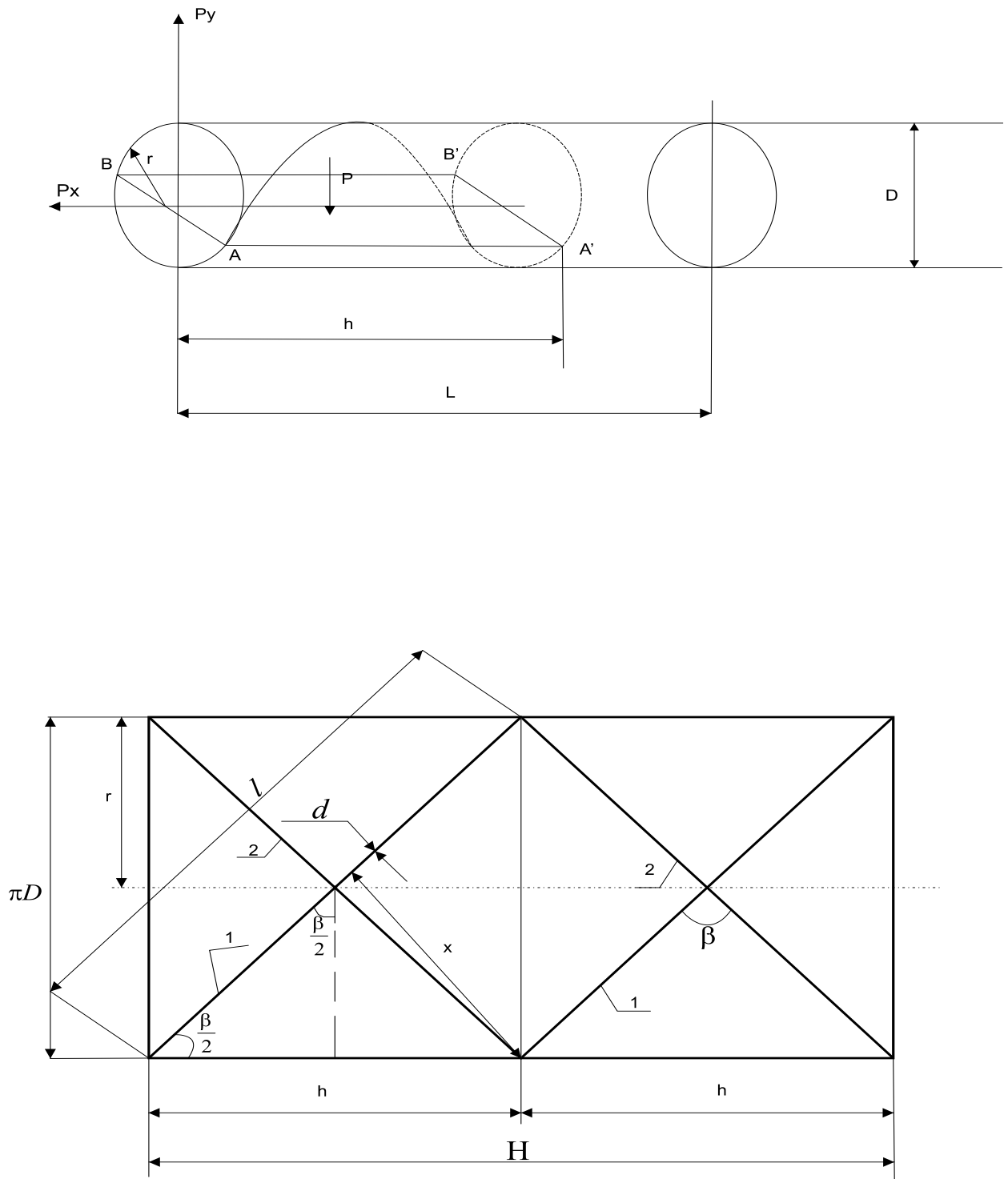


Рисунок 5.8 — Развертка намотки на плоскость.

Шаг намотки одного витка  $h$  определяется из соотношения окружной -  $v_o$  скорости вращения паковки (рукава) при формировании армирующей структуры намотки и переносной -  $v_H$  скорости раскладки нити вдоль обрабатываемой паковки.

Угол скрещивания витков нитей к оси паковки также можно задавать соотношением скоростей  $v_H$  и  $v_O$ ,

$$\text{Так} \quad \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{v_H}{v_O} = \frac{h n_B}{\pi D n_B} = \frac{h}{2\pi r}, \quad (5.11)$$

где  $h$  – шаг намотки;

$r$  – радиус намотки паковки;

$n_B$  – частота вращения паковки;

$l$  – длина одного витка намотки.

Из рисунка 5.8 так же видно, что в одном шаге намотки  $h$  может укладываться несколько нитей (или групп нитей-жгутов), до полного заполнения отрезка  $x$ . Очевидно, что при сомкнутой намотке (намотке нитей или лент без промежутков, такая структура намотки используется при оплётке трубопроводов изоляционными лентами) весь промежуток  $x$  в шаге намотки заполнен нитями (жгутами).

Размер отрезка  $x$  можно определить по формуле:

$$x = \pi D \cos \frac{\beta}{2}, \quad (5.12)$$

а шаг намотки  $h$  равен:

$$h = \frac{\pi D}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \quad (5.13)$$

Максимальное заполнение оплётки нитями диаметра  $d$  будет наблюдаться при условии:

$$m = \frac{x}{d} = \frac{\pi D \cos \frac{\beta}{2}}{d} \quad (5.14)$$

При наличии двух жгутов нитей в шаге намотки рукава на 1 см его образующей максимально может приходиться  $2 m \sin \beta/2$  элементов нитей, а в направлении окружности  $2 m \cos \beta/2$  элементов на 1 см.

Если обозначим через  $P_1$  нагрузку приходящуюся на один элемент намотки (оплётки) каркаса, то нагрузка, приходящаяся на 1 см длины образующей будет равна

$$P_y = 2P_1 m \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (5.15)$$

Нагрузка, приходящаяся на один объёмный слой нитей в направлении оси армирующего каркаса, составит:

$$P_x = 2P_1 m \cos^2 \frac{\beta}{2}$$

Из рисунка 5.8 видно, что отношение

$$\frac{P_y}{P_x} = \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} \quad (5.16)$$

Учитывая, что нагрузка, приходящаяся на армирующую намотку рукава в радиальном направлении в двое выше чем в направлении оси, можно определить значение угла  $\beta$  - (угла скрещивания витков намотки), при котором деформирующее усилие  $P_1$  приходящееся на один элемент оплётки каркаса на одну нить, являлось равнодействующим от осевой и радиальной нагрузок.

Очевидно, что в этом случае:

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \sqrt{2} = 1,414; \quad \frac{\beta}{2} = 54^{\circ}44' \text{ или } \beta \approx 109^{\circ}.$$

Именно такое значение угла скрещивания витков  $\beta$  в армирующей оплётке обеспечено при формировании двухслойного напорного рукава рисунок 5.5. Суммарная нагрузка, приходящаяся на нити одного жгута в намотке, при максимальном значении  $m$  составит:

$$P_c = \frac{P_1 m}{2} \quad (5.17)$$

Суммарная величина разрывных усилий, действующих на нити одного объёмного слоя намотки на шаге  $h$ , под воздействием внутреннего давления  $P$ , в момент его разрыва составляет:

$$P_C = \frac{P_1 \pi D^2}{8} \sqrt{4 \operatorname{ctg}^2 \frac{\beta}{2} + 1} = \frac{P_1 \pi \sqrt{3} D^2}{8} \quad (5.18)$$

Приравнивая выражения (5.17) и (5.18) и решая его относительно  $P_1$  определим значение разрывной нагрузки одиночной нити, обеспечивающей прочность рукава до разрыва.

С учётом требуемого запаса прочности каркаса можно рассчитать количество нитей в армирующей намотке, в зависимости от величины внутреннего давления  $P$  (внешней нагрузки прикладываемой к композиту). Если максимальное число нитей в одном слое намотки  $m$ , формируемой при сомкнутой структуре намотки не достаточно для сопротивления внешнему воздействию, то число слоёв оплётки можно увеличить, однако при этом следует уже рассматривать распределение нагрузки между смежными слоями намотки. Методика расчёта давления в смежных слоях намотки приведена в работе [64].

## Выводы по главе 5

1. Изучение структур намотки мотальных паковок и их оптимизацию целесообразно проводить с построения разверток намотки мотальных паковок на плоскость, это позволяет определять взаимное расположение нитей различных систем, их пересечений (связность) в армирующей структуре 3D намоток, что

особенно важно при конструировании высокопрочных композиционных материалов с устойчивой к сдвигу и расслоению структурой.

2. Многообразие геометрических форм тел, имеющих ось вращения, на базе которых возможно формировать намотки различных структур, а, следовательно, и их развертки, позволяет оптимизировать раскладку армирующих нитей (волокон) в готовом изделии с известным значением угла скрещивания витков  $\beta$ , по отношению величине и направлениям внешних воздействий, с требуемым уровнем анизотропии свойств.

3. При формировании армирующих заготовок композиционных материалов (намоткой), по их разверткам на плоскость можно заранее установить наиболее рациональное расположение нитей в армирующей структуре паковки, путем расчета значения угла скрещивания витков  $\beta$ , при котором разрушающие воздействия на намотку со стороны внешних прилагаемых усилий будут минимальными.

## **Глава 6. Разработка технологии армирования полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов с использованием намоточных структур**

В основе технологии получения углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), создаваемых в настоящее время, лежат контролируемые процессы деструкции полимерных композитов, наполненных углеродными волокнами и углеродной матрицей на основе фенольных, фенолофурановых смол или пеков. Данные технологии освещены в работах российских и зарубежных ученых [84,85].

УУКМ широко применяются в качестве конструкционных термоустойчивых до 2500°C (с защитой от окисления), триботехнических, абляционных, теплозащитных и фрикционных материалов [86,87]. Не смотря на большие успехи, достигнутые учеными в области разработки и производства углерод-углеродных конструкционных композиционных материалов, в данной области науки и производства имеются и проблемы, препятствующие дальнейшему развитию данного направления.

Следует отметить, что основными армирующими структурами, используемыми в настоящее время при производстве углерод-углеродных композитов, являются углеродные ткани, углеродные нетканые полотна, плетельные и вязанные структуры и реже намотки. Данные армирующие структуры пропитываются при особых условиях углеродной матрицей на основе каменноугольных пеков.

К основным технологическим проблемам производства изделий УУКМ относятся:

1. Сложности производства крупногабаритных изделий, которые, по нашему мнению, обусловлены:

- неоднородностью структуры углеродных армирующих компонентов заготовок, приводящей к неравномерному заполнению объёма углеродной матрицей и, как следствие, разнородному теплофизическому состоянию в различных участках изделия;

- недостаточностью теоретических исследований в области технологий армирования заготовок для создания УУКМ, разработки их новых структур с максимальным коэффициентом заполнения объёма композита и многомерным ориентированием углеродных моно-волокон.

2. Несовершенством конструкций существующего технологического оборудования (мотальных машин и ткацких станков специального назначения), которое обеспечивало бы создание заданных армирующих структур, необходимых для обеспечения требуемых технологических процессов, протекающих при формировании заготовок УУКМ.

3. Большое количество технологических переходов (многостадийность) при производстве армирующих заготовок с заданным направлением ориентации волокон, что приводит к большим затратам электроэнергии и низкой производительности труда и оборудования.

Учитывая вышеизложенное целями проводимых в данном разделе исследований являются:

1. Разработка структур армирования заготовок фрикционных УУКМ углерод-углеродных композиционных материалов с максимальным коэффициентом заполнения и упорядоченным (заданным) расположением непрерывных углеродных волокон в объёме композита;

2. Разработка мотального оборудования для формирования заготовок УУКМ, обеспечивающего требуемые технологические параметры создаваемых структур.

3. Разработка технологических процессов изготовления УУКМ конструкционного назначения.

### **6.1. Разработка технологии производства тормозных дисков на базе УУКМ формируемых намоткой на прецизионных мотальных машинах**

Для решения поставленной задачи, прежде всего, отметим требования, предъявляемые к фрикционным материалам и конечным изделиям (тормозным дискам), для чего проведем анализ влияния параметров мотального механизма на технологию армирования заготовок тормозных дисков.

Следует отметить, что создание новых конструкционных фрикционных материалов лежит в основе решения вопросов повышения надёжности и долговечности работы узлов трения. В настоящее время накоплен большой опыт, как в нашей стране, так и за рубежом, по формированию полимерных композиций для создания фрикционных материалов, однако они, не в полном объеме, отвечают все возрастающим требованиям потребителей, так как не способны работать длительное время при высоких температурах и переменных динамических нагрузках [88,89]. Поэтому, задачи по созданию новых структур армирования композиционных материалов и создание высокоэффективных фрикционных пар трения, остаются актуальными.

Исследования в работах [90,91], проводимые в поисках новых композиций на полимерной и углерод-углеродной основе, для формирования фрикционных материалов, применяемых для изготовления тормозных дисков показывают, что качество армирования и применения наполнителей, во многом, определяют свойства конечных изделий, такие как:

- коэффициент заполнения объёма изделия армирующим наполнителем;
- коэффициент трения фрикционных пар;
- ориентация непрерывных волокон по отношению к рабочей поверхности контакта фрикционных пар;

- износостойкость и устойчивость к деформациям под переменной нагрузкой;
- электрические свойства и теплопроводность фрикционных материалов;
- работа фрикционного материала с наполнителями и т.д.

Современные полимерные фрикционные композиционные материалы создаются с использованием различных наполнителей, которые вносят большое разнообразие новых, специфичных и полезных свойств. Но, следует отметить, что все они ограничены по температурному диапазону применения в реальных условиях эксплуатации. Температура спекания полимера определяет теплостойкость наполнителя и всего конечного продукта. Главная задача при армировании фрикционного материала наполнителями состоит в максимальном заполнении заготовок волокнистым наполнителем, равномерном и дозированном распределении возможных присадок в структуре композита. Эта задача может быть успешно решена при использовании сомкнутых, замкнутых и спиралевидных 3D намоток различной степени замыкания  $p$ , которым, соответственно, характерны максимальная плотность и заданная пористость «ячеистых» структур. Как отмечалось ранее, данные структуры обладают не только расчетной пористостью, но и направлением сдвига пор – «опережающие» смещаются по ходу часовой стрелки, а «отстающие» против хода. Особые свойства при этом получают фрикционные пары, формируемые из углерод - углеродных материалов - так называемые: «Термоструктурированные композиционные углерод-углеродные материалы».

Вследствие того, что углеродные волокна имеют очень малый условный диаметр (2-12 мкм) и большую активную развитую поверхность (2000 м<sup>2</sup>/г), создаются условия для сведения к минимуму внутренних и внешних диффузионных сопротивлений массообмену (при насыщении наполнителя углеродной матрицей), что неизбежно при производстве заготовок углерод-углеродных тормозных дисков.

Исходя из этого, межфиламентное проникновение полимерного связующего - прекурсора первого слоя углеродной матрицы будет обеспечиваться за счет высокого капиллярного смачивания углеродного волокна. Данный процесс протекает тем быстрее, чем выше коэффициент заполнения  $k_z$  объема углеродного материала и меньше радиус капилляров. Кроме того, такие материалы могут состоять не только из основы, или углеродно-волоконной заготовки уплотненной углеродной матрицей, но и она может насыщаться термостойкими наполнителями, например, кремнием. Следует отметить, что традиционная технология армирования и изготовления углеродных тормозных дисков состоит в изготовлении кольцевых волокнистых заготовок из нетканого иглопробивного материала, насыщенного углеродными волокнами и их последующего уплотнения углеродной матрицей, заполняющей поры заготовок. Расположение армирующих волокон в нетканой волокнистой структуре хаотично, по сути - это двухмерные слои с различной (хаотичной) ориентацией волокон. Поэтому, для устранения этого недостатка, в составе армирующих заготовок целесообразно использовать 3D намотки из непрерывных углеродных волокон, а заданная ориентация их по отношению к рабочей поверхности трения обеспечивается за счет требуемого угла скрещивания витков  $\beta$ , как нитей базовой, так и перевивочных структур.

В работе [92] отмечено, что увеличение процентного содержания наполнителя за счёт уменьшения связующего приводит к увеличению коэффициента трения. Принимая во внимание все выше перечисленные требования к структурам армирования полимерных и углерод-углеродных композитов, следует более подробно остановиться на возможностях применения для этих целей намоточных структур, которых большое множество. Особое внимание следует уделить сомкнутым намоткам и их развёрткам, которые позволяют наглядно проанализировать расположение нитей, то есть ориентацию непрерывных углеродных волокон в структуре прекурсора, а, следовательно, и в готовом изделии, что очень важно для изучения и проектирования свойств создаваемых фрикционных материалов [93,94].

Особый интерес в данном случае имеет формируемая поверхность трения, которая является секущей плоскостью, перпендикулярной к оси мотальной паковки. Рабочая поверхность трения, в данном случае, будет сформирована торцевыми срезами волокон, более устойчивыми к истирающим воздействиям, чем боковая поверхность углеродного волокна, а, следовательно, наряду с более высоким коэффициентом трения, возрастает и механическая прочность фрикционного материала. Равномерное распределение волокон, при армировании заготовок углеродными непрерывными волокнами, и заданной их ориентации, проводимое на базе 3D сомкнутых намоток, исключает образование «задигов», «прихватывания» групп волокон, обеспечивает равномерный износ фрикционного материала, при этом, обеспечивается однопроцессная высокопроизводительная технология их производства. Исследование структур сомкнутых, замкнутых и спиралевидных намоток, а также их прочностных свойств подробно изложено ранее, в разделе 2, и параграфе 5.3.

Полученные, в ходе проведенных исследований результаты, позволяют проектировать армирующие структуры углерод-углеродных материалов строго расчетным путем, задавая требуемые показатели пористости заготовок и направления расположения волокон в структуре композита.

Однако следует сделать некоторые дополнения и пояснения по процессу формирования заготовок тормозных дисков больших размеров на существующем прецизионном мотальном оборудовании. Основная сложность, в данном случае, состоит в том, что заготовки тормозных дисков имеют значительные размеры, внутренние диаметры заготовок составляют от 280 до 340мм, а наружные диаметры от 320 до 700мм. Это предъявляет особые требования к конструкции мотального оборудования, как по возможности формирования крупногабаритных паковок, так и по их большой массе. Кроме того, для обеспечения заданной ориентации волокон, по отношению к «рабочей» поверхности трения, а таковыми являются торцы мотальной паковки и срезы колец. Возникают сложности формирования на паковке большого диаметра крестовых 3D намоток с углом скрещивания витков  $\beta$  не менее

20°. В противном случае структура намотки будет неравновесной, так как не будет достаточного закрепления витков в смежных слоях намотки. Витки намотки могут не успевать пересекаться друг с другом, а ориентация волокон, по отношению к «рабочей» поверхности заготовки тормозного диска будет нарушена (волокна будут расположены почти параллельно торцам диска, а, следовательно, структура намотки потеряет прочность). Рассмотрим данное положение подробнее. Для формирования крестовой намотки с достаточным углом скрещивания витков  $\beta > 20^\circ$ , необходимо выполнение условий:

$$W > 1, \text{ и } \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} > 12^\circ, \quad (6.1)$$

где  $W$  – число витков намотки в одном объемном слое намотки (формируемом при движении раскладчика нити слева - направо и обратно);

$\beta$  – угол скрещивания витков намотки.

Но для любого мотального механизма, число витков в слое намотки можно определить из выражения:

$$W = H/h, \quad (6.2)$$

где  $H$  – высота паковки (размах раскладчик нити),

$$\text{шаг витков намотки.} \quad h = h_K/i_0 = 2H/k i_0, \quad (6.3)$$

$$\text{тогда} \quad W = H k i_0 / 2H = k i_0 / 2, \quad (6.4)$$

где  $k$  – число оборотов пазового кулачка раскладчика нити за цикл его движения;

$h_K$  – шаг канавки пазового кулачка раскладчика нити;

$i_0$  - общее передаточное отношение от раскладчика нити к паковке.

Рассмотрим процесс формирования мотальной паковки для нарезки из нее цилиндрических заготовок (колец) используемых в качестве заготовок -препрегов тормозных дисков. Для формирования таких заготовок наиболее близка по конструкции прецизионная мотальная машина «Foster» (США), технологическая схема заправки нитью которой показана на рисунке 6.1.

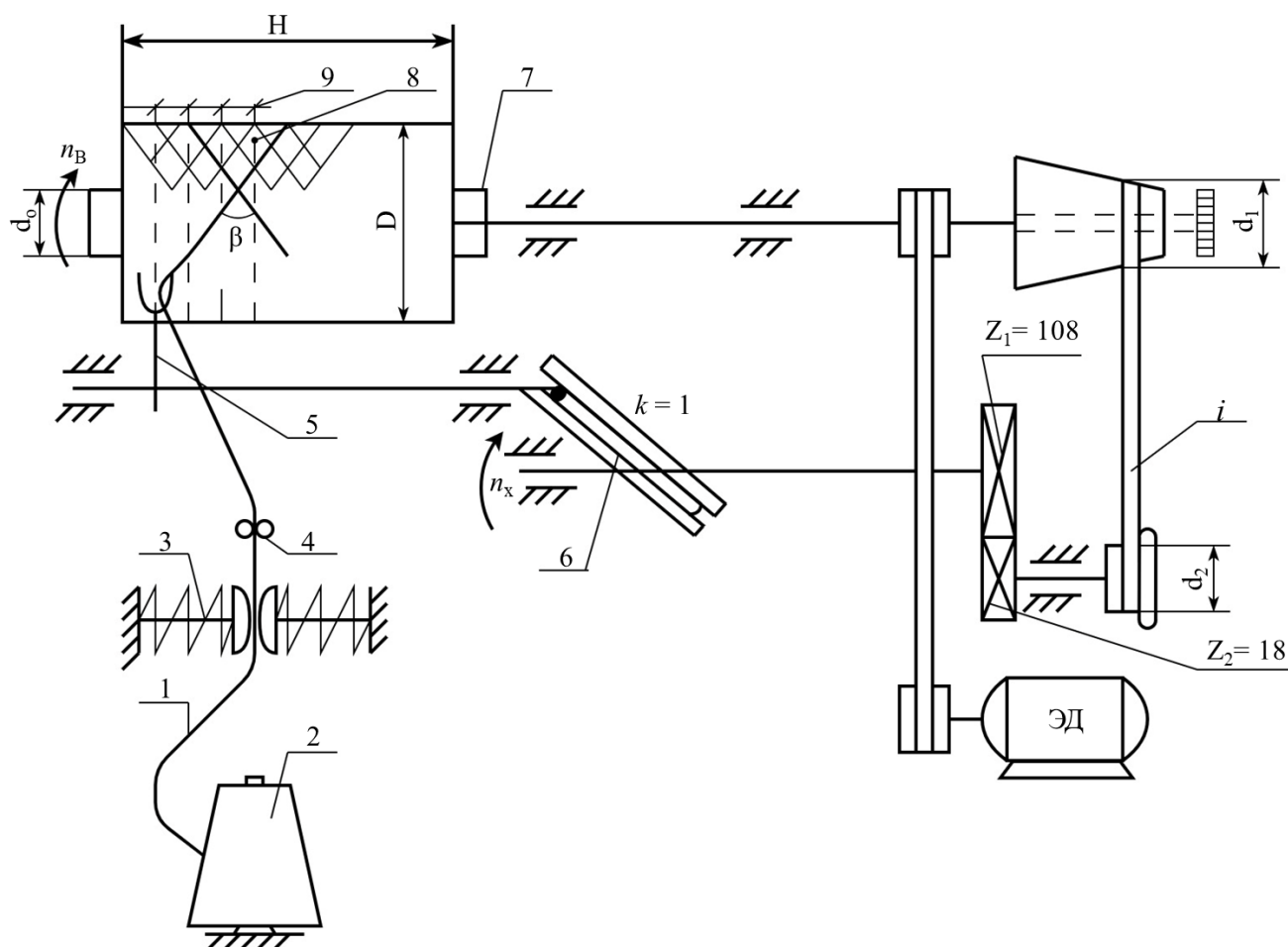


Рисунок 6.1 — Технологическая схема заправки прецизионной мотальной машины «Foster» (США).

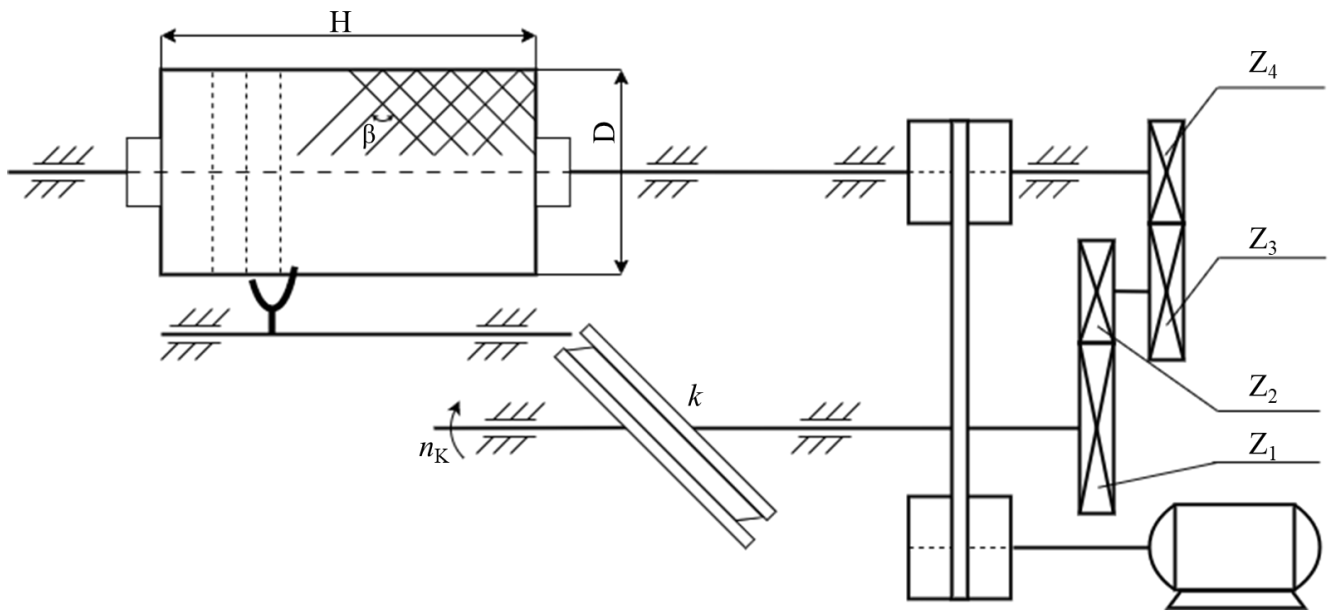


Рисунок 6.2 — Схема модернизированной конструкции мотальной машины «Foster» (США).

Из рисунка 6.1 видим, что нить 1, сматывается с питающей паковки 2, проходит через нитенатяжитель 3, направляющие прутки 4, глазок раскладчика нити 5, получающего движение от пазового кулачка 6, и наматывается на цилиндрическую оправку 7 диаметром  $d_0$ . На оправке формируется базовая цилиндрическая паковка 8, которая после формирования разрезается на кольца 9 заготовок тормозных дисков. Привод оправке с паковкой сообщается от электродвигателя (ЭД) через клиноременную передачу. Раскладчик нити получает движение от вала оправки через коноидный вариатор  $d_1/d_2$ , зубчатые шестерни  $Z_1=108$  и  $Z_2=18$  и пазовый кулачок 6, число пазов которого  $k=1$ .

Так как  $V_n = h_K n_K$ ; а  $V_o = \pi D n_o$ ,

$$\text{то} \quad \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = V_n / V_o = h_K n_K / \pi D n_o = h_K / \pi D i_0 \quad (6.5)$$

$i_0 = Z_1 i / Z_2 = 108 i / 18 = 6 i$ , где  $i \approx 1$  передаточное отношение коноидного вариатора.

Из формулы (6.6) видно, что чем больше диаметр намотки  $D$ , тем меньше значение  $\beta$ . Так, в начале наматывания паковки на машине «Foster» (США), при  $H = 180\text{мм}$ ;  $D = 40\text{мм}$ .

Угол сдвига витков, для получения сомкнутой намотки определим из выражения:

$$\Psi_{1,p+1} = 2\pi p(ki_{oc} - n_1) = \frac{2d}{D \sin \frac{\beta}{2}} = \Psi_c = 360p(6 i_0 - n_1) \quad (6.6)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = 2 H Z_2 / \pi D Z_1 = 2 \times 180 \times 18 / 3,14 \times 40 \times 108 = 0,5; \beta/2 = 27^\circ; \beta = 54^\circ.$$

Казалось бы, условие  $W = H/h = 180/180 = 1$  и  $\beta/2 > 12^\circ$  выполняется, но в закреплении смежных слоев намотки участвует только один виток, а при увеличении диаметра намотки паковки до 200мм угол скрещивания витков резко уменьшится и тогда:

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = 2 * 180 * 18 / 3,14 * 200 * 108 = 0,254; \beta/2 = 0,25^\circ; \beta \approx 0^\circ.$$

То есть, намотка превратится в параллельную, не удовлетворяющую требуемым условиям.

Очевидно, что данная конструкция кинематической цепи мотальной машины «Foster» (США), не позволяет формировать мотальные паковки заданных параметров. И изменения в конструкцию могут быть внесены по двум направлениям:

- путем увеличения высоты паковки  $H$ , что проблематично (потребуется замена пазового кулачка, с увеличением  $k$ );
- путем применения  $p$ -замкнутых или  $p$ - сомкнутых намоток, путем, изменения механизма передачи движения от раскладчика нити к паковке, за счет исключения

коноидного вариатора и замены его сменными шестернями с расчетным числом зубьев. Схема такого механизма показана на рисунке 6.2.

Из рисунка 6.2 следует, что  $i_0 = Z_1 Z_3 / Z_2 Z_4 = 6 Z_3 / Z_4$ .

При  $Z_3=24$ ; и  $Z_4=22$

$$i_{0c1} = 6 \times 20 / 22 = 60 / 11 = 5,45;$$

$$i_{0c2} = 6 \times 24 / 22 = 6 \times 12 / 11 = 6,55.$$

$$\text{Тогда: } \psi_{1,p+1} = 360p(6 \times 24 / 22 - 6) = 360p \ 6 / 22 = 360p3 / 11; \quad (6.7)$$

$$\text{при этом: } \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = 2 \times 180 / \pi \times 40 \times 6 = 60 / \pi \times 40 = 6 / 4\pi = 3 / 2\pi = 0,477.$$

$$\text{Т.е. } \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = 25^0; \text{ а } \beta = 50^0.$$

$$\psi_{1,p+1} = 360p(6 \bullet 20 / 22 - 5) = 360p \ 10 / 22 = 360p5 / 11;$$

Размеры пор составят:  $b = \pi 40 / 11 = 11 \text{ мм};$

$$f = 2 \bullet 180 / 6 \bullet 11 = 5,44 \text{ мм}.$$

$$\text{Второе условие } W = Hk i_0 / 2H = k i_0 / 2 = 1 \bullet 6,55 / 2 = 3,275 \text{ витка, т.е.} > 1. \quad (6.8)$$

В данном случае оба условия формирования требуемой структуры выполняются и мотальный механизм пригоден для формирования заготовок армирующих структур тормозных дисков.

Из вышеизложенного следует, что особое внимание, при формировании сомкнутой намоткой армирующих структур, должно уделяться значению угла скрещивания витков  $\beta$ , так как он, с ростом диаметра намотки, будет уменьшаться. Изменяться будет и форма ромбов. При этом, малая диагональ ромба  $f$ , будет

оставаться неизменной, а большая диагональ  $b$  будет возрастать. Важность этого момента заключается в том, чтобы сохранить в структуре намотки заготовок тормозов требуемое значение угла ориентации волокон, исключив боковое их истирание в плоскости трения фрикционного материала. Поэтому, при проектировании скоростных режимов работы мотального оборудования следует выбирать такие значения переносного движения нити (скорость движения раскладчика нити), относительно окружной скорости вращения паковки, при котором, будет формироваться намотка с большим углом скрещивания витков  $\beta$  в самом начале формирования паковки. Схема изменения угла скрещивания витков  $\beta$ , при увеличении диаметра намотки мотальной паковки и формы ромбов, при различных диаметрах намотки 3D приведена на рисунке 2.6.

Методика расчёта всех требуемых параметров настройки мотального оборудования, для формирования структур сомкнутых, замкнутых и спиралевидных структур намоток, главным из которых является величина передаточного отношения от раскладчика нити к паковке, (необходимые для создания требуемого угла сдвига витков данных структур), подробно изложены в разделе 2.

Формирование заготовок для изготовления углерод-углеродных тормозных дисков целесообразно проводить по «сухому» способу намотки, предварительно пропитанных ровингов.

По разработанной методике была изготовлена заготовка для изготовления высокоплотных фрикционных углерод-углеродных композиционных материалов увеличенных габаритов (тормозные диски), показанная на рисунке 6.3.

**Описание эксперимента:**

Рисунок 6.3 — Заготовка под ФКУМ методом намотки.

Используемое оборудование:

Станок намоточный РПН – Н – 1200 – станок радиально – перекрестной намотки.

Характеристики намотанной армирующей части:

Нить – UMT 49 – 12K - EP

Угол скрещивания витков -  $17^\circ$

Габариты изделия –  $\varnothing 165 \times 270$  мм

Плотность намотанного изделия –  $1,13 \text{ г/см}^3$

Технология формирования матрицы

Набор плотности Экспериментальной намотанной заготовки проводился в рамках отработанных технологических процессов АО «НИИГрафит». В данном случае первично выполнено 2 цикла предварительной пропитки пеком с последующей карбонизацией (П1 и К1). Предварительные циклы пропитки и карбонизации необходимы для упорядочения структуры углеродного волокна и с целью исключения дальнейших изменений геометрии заготовки в ходе дальнейших термохимических превращений.

По итогам проведения предварительных циклов осуществлена предварительная механическая обработка (ПМО) заготовки в размер близкий к исходному размеру каркаса Ø165 x 270 мм с целью замера плотности, а также открытия внешней пористости материала, способствующему более качественной пропитке пеком на дальнейших переделах. Плотность фрикционного композиционного углеродного материала составила - 1,75 г/см<sup>3</sup>.

## **6.2. Разработка технологии формирования слоисто-каркасных намоток, как основы армирования композиционных материалов конструкционного назначения**

К перспективным композиционным материалам относятся гибридные материалы, сформированные из более чем двух видов армирующих наполнителей или матриц разной природы с различными свойствами. Так, в композиционном материале «тайгермеш», выпускаемом в Великобритании, в качестве армирующего наполнителя, наряду со стеклянными волокнами, используют волокна карбида кремния, кевлара и углеродные волокна [95].

Создание новых армирующих композиций обеспечивает повышение эксплуатационных характеристик конструкций, что достигается и использованием специфических разновидностей структур (сотовые и «интегральные конструкции»), к которым относятся: многослойные композиционные материалы многофункционального назначения, которые в зависимости от свойств компонентов могут сочетать конструкционные свойства с радиопрозрачностью, химостойкостью, радиационной стойкостью, теплоизоляцией, теплозащитой и т.д.

Современные токопроводящие, формируемые, в том числе, с использованием электропроводных полимеров [96] и магнитоэлектрические композиты, наполненные углеродными компонентами (ферритами, аморфными металлами), являются радиоэкранирующими и радиопоглощающими материалами. Именно такие конструкции применяются для уменьшения радиолокационной заметности (технология Stealth), экранирования электрических устройств. Армирование данных композитов требуют новых решений, примером которых могут быть слоисто-каркасные намотки, рассмотрим их подробнее.

Одними, из менее изученных, но перспективно востребованных структур армирования композиционных материалов специального назначения, являются слоисто-каркасные намотки. Данные структуры могут формироваться с использованием в одной паковке намоток нескольких структур и из нитей различной природы. Каждая из используемых структур намоток, в конечном изделии композита, выполняет свою, свойственную только ей функцию, при этом, в каждой из структур имеется возможность использовать нити различного сырьевого состава и линейной плотности. Это значительно расширяет диапазон свойств и областей применения выходных – конечных продуктов (изделий различного назначения), например, формирование композиционных фильтров тонкой очистки и обеззараживания воздуха, или упрочняющих оболочек с наполнителем в одном объёме паковки. Самое главное, структуры слоисто-каркасных намоток обладают переменной, заданной расчетным путем, удельной плотностью намотки в радиальном направлении мотальной паковки, то есть, переменным коэффициентом заполнения объёмных слоев композита. Наиболее наглядно продемонстрировать слоисто-каркасные намотки позволяет схема мотальной паковки сформированной на базе сомкнутой и замкнутой намоток, приведённая на рисунке 6.9 а) и разрез фильтровального картриджа композиционного фильтра, сформированного слоисто-каркасной (сомкнутой и замкнутой) намоткой, рисунок 6.9 б).

Разработка технологии армирования КМ слоисто-каркасными намотками, заключается в расчете параметров настройки специального мотального оборудования, для получения каждой из структур (используемых сомкнутых и замкнутых намоток в одной паковке), причем, сомкнутая намотка выполняет роль слоёв, а замкнутые намотки роль каркасов [97].

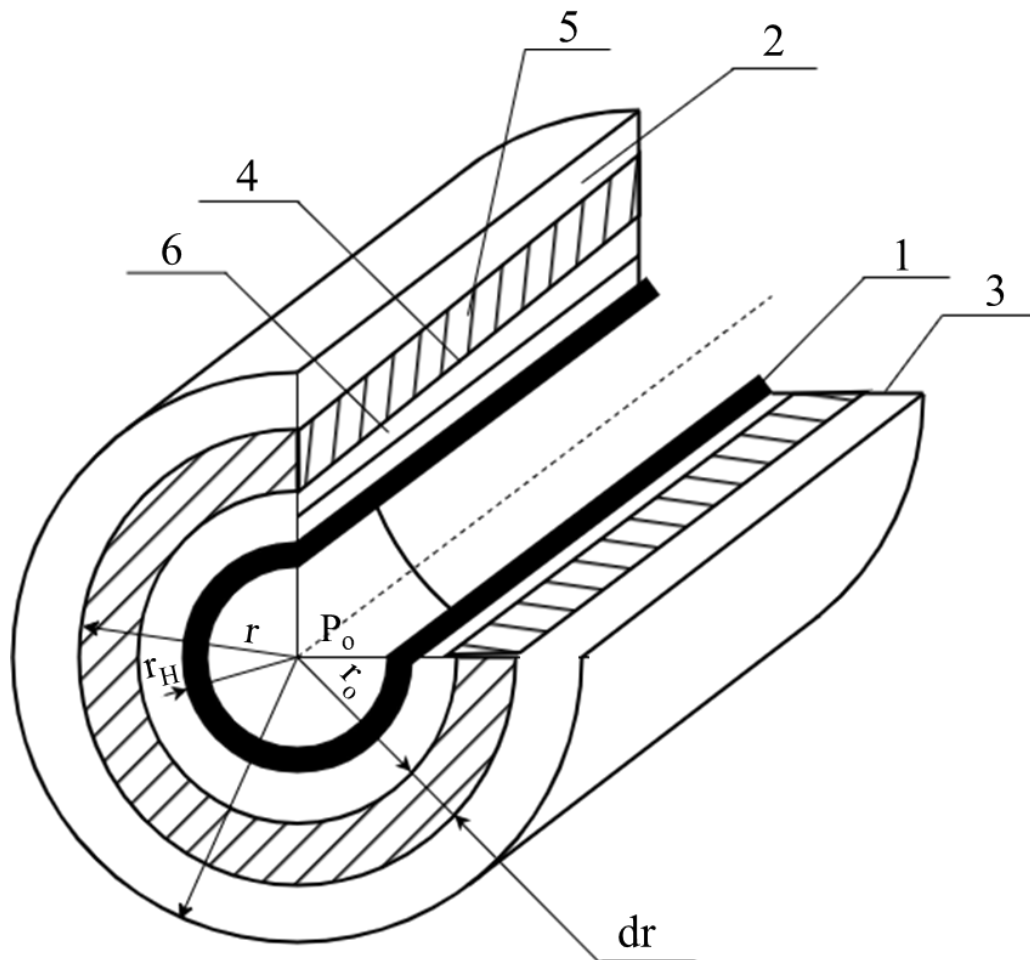


Рисунок 6.4 — а) Схема мотальной паковки сформированной слоисто-каркасной намоткой.

На рисунке 6.4 а) изображен разрез фильтровального картриджа композиционного фильтра, сформированного слоисто-каркасной намоткой, где: 1- перфорированный патрон, 2-фильтровальная перегородка, 3- элементарный слой намотки, толщиной  $dr$ , 4- каркас нового слоя намотки.

$P_a$ — давление воздуха на внешней поверхности фильтровальной перегородки (Па);

$P_o$ — внутреннее давление воздуха, (Па);

$r$ — текущий радиус намотки фильтровальной перегородки (м);

$r_n$ — наружный диаметр намотки фильтровальной перегородки;

$r_o$ —внутренний диаметр фильтровальной перегородки (м).

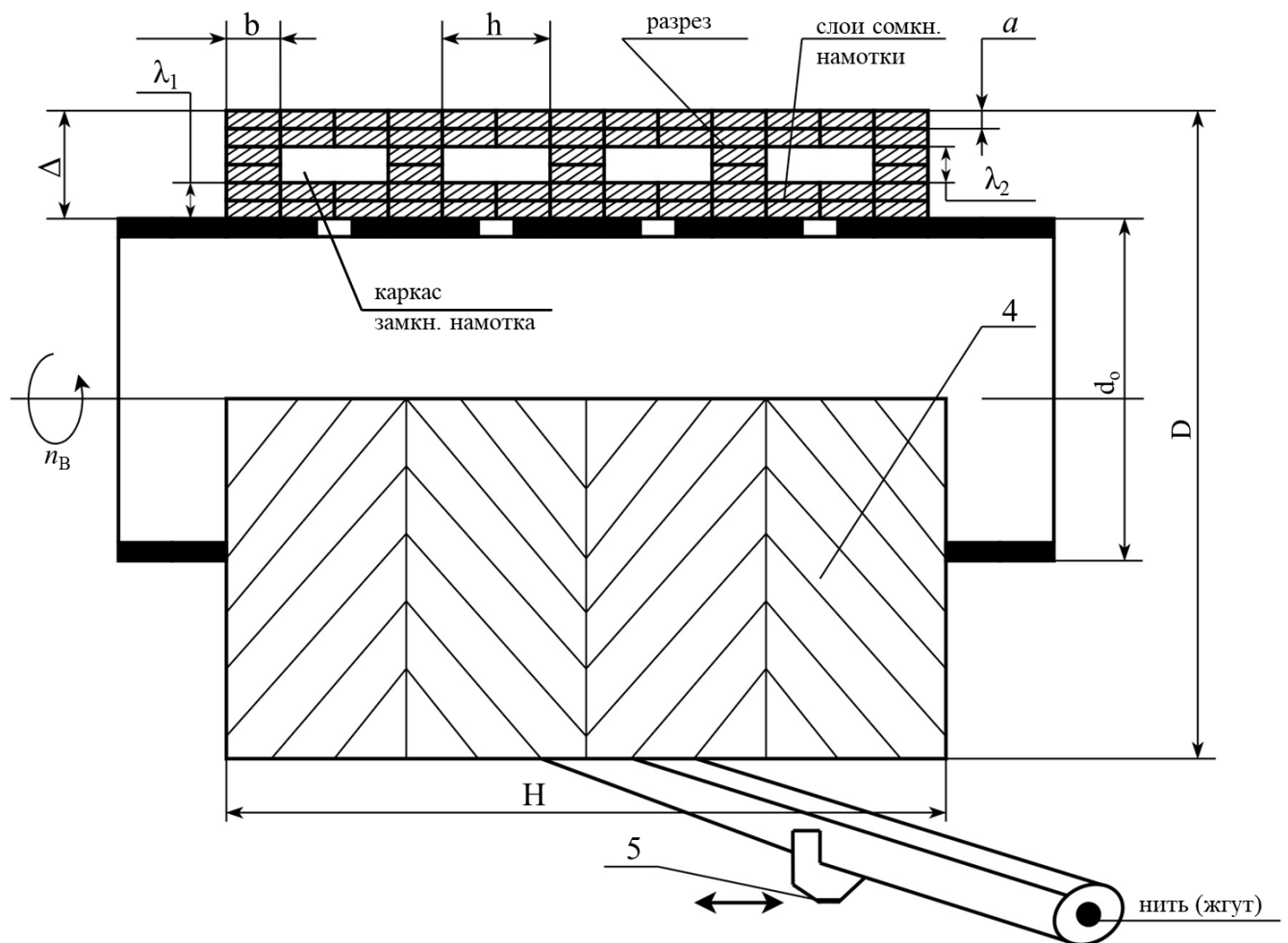


Рисунок 6.5 — б). Разрез фильтровального картриджа композиционного фильтра, сформированного слоисто-каркасной (сомкнутой и замкнутой) намоткой.

Из рисунка 6.5. б) видно, что в качестве слоёв использована намотка нитей на оправку в виде сомкнутой структуры, а каркас сформирован замкнутой намоткой.

Диаметры намотки (толщина слоя и каркаса) может быть задана, и ограничена только возможностями мотального механизма. Кроме того, для формирования на одном мотальном механизме различных структур, требуется специальная модернизация кинематической схемы механизмов намотки и раскладки нити, которая позволит быстро переходить от формирования одной структуры намотки на другую.

На рисунке 6.6 представлена кинематическая схема модернизированного мотального механизма «Makromat» (Германия), позволяющего формировать слоисто-каркасные намотки, где:

$H$  - высота паковки (ширина раскладки нити):

$\lambda_1$  – толщина намотки слоёв сомкнутой структурой намотки;

$\lambda_2$  - толщина намотки слоёв замкнутой структурой намотки;

« $\Delta$ » - толщина намотки паковки:

$D$  – диаметр намотки мотальной паковки;

$a$  – толщина жгута;

$b$  - ширина жгута;

$d_0 = 28$  мм – диаметр патрона, (оправки) мотальной паковки.

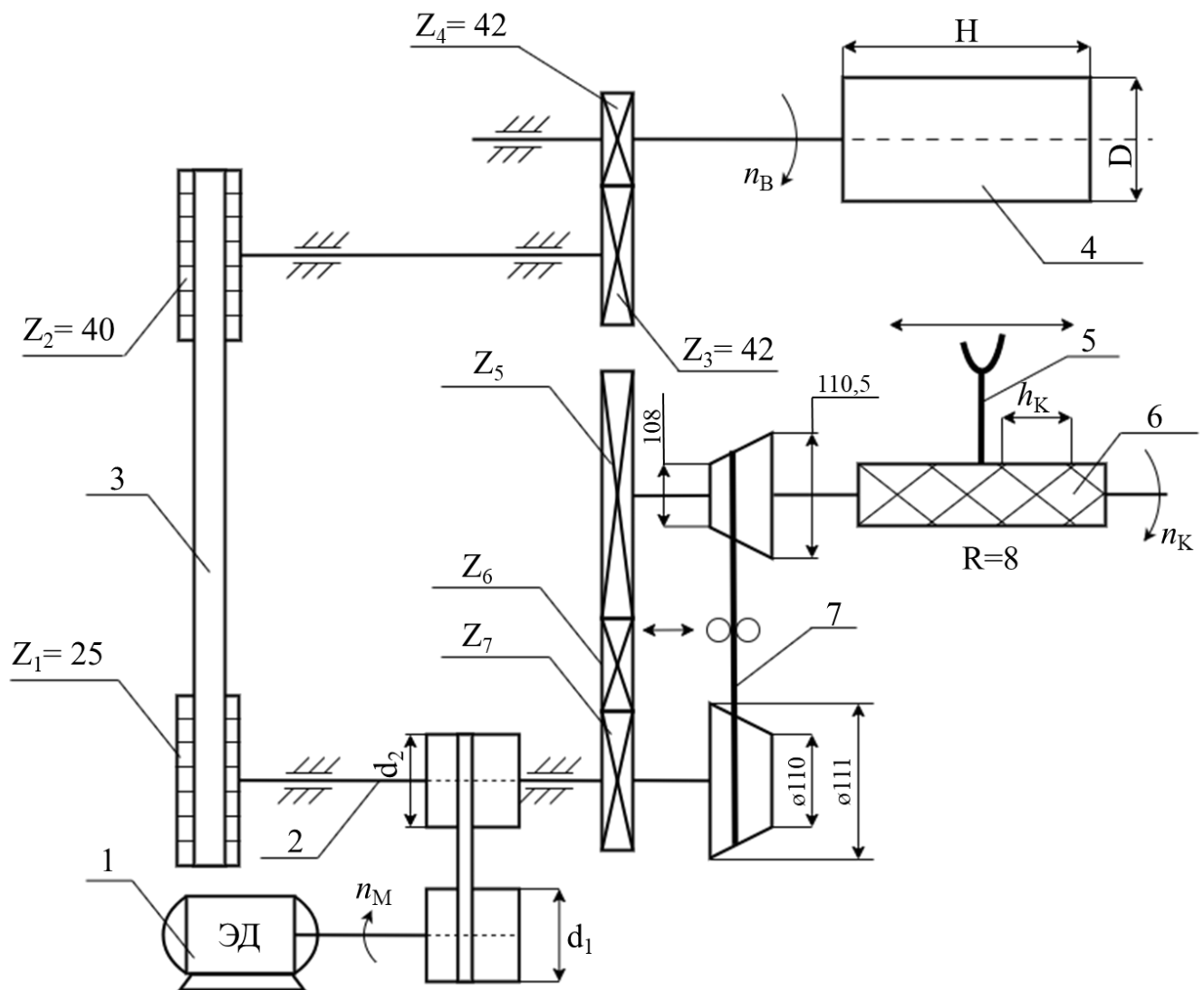


Рисунок 6.6 — Кинематическая схема модернизированного мотального механизма «Makromat» (Германия), для формирования слоисто-каркасных намоток.

Мотальный механизм включает приводной электродвигатель 1, с частотой вращения ротора  $n_M = 2700$  об/мин, от которого вращение, через клино-ременную передачу и шкивы  $d_1$  и  $d_2$  коноидного вариатора, передается промежуточному валу 2, от которого через цепную передачу 3 – зубчатые шестерни  $Z_1$   $Z_2$  и прямозубые шестерни  $Z_3$   $Z_4$ , вращение передается мотальной паковке 4. Раскладчик нити 5, получает движение, вдоль образующей паковки, от пазового кулачка 6, (имеющего четыре паза в одном и четыре паза в обратном направлении). То есть  $k=8$ ,

Коноидный вариатор 7, с диаметрами коноидов 108-110,5мм и 110-111мм, а так же прямозубые шестерни  $Z_5$ ,  $Z_6$  («паразитная») и  $Z_7$ , получают вращение от промежуточного вала 2.

Рассмотрим кинематику данного механизма при формировании слоисто-каркасной намотки заданных параметров.

Сомкнутая структура намотки будет формироваться, когда шестерня  $Z_6$  выведена из зацепления с шестерней  $Z_5$  привода пазового кулачка раскладчика нити, а коноидный вариатор 7 включен в работу.

В этом случае угол сдвига между витками  $1^{ой}$  и  $(p+1^{ой})$  парами слоев намотки определяется по формуле:

$$\psi_{1,p+1} = 360 P(ki_o - n_1) \quad (6.9)$$

$$\psi_{1,p+1} = 360 P(8 \frac{8}{5} i - n_1), \quad (6.10)$$

где  $i$  – передаточное отношение, создаваемое коноидным вариатором.

$$\psi_{1,p+1} = 360 P(64/5 i - 12), \text{ т.е. } (n_1 = 12).$$

Угол скрещивания витков в начале намотки составит:

при  $i_o = 40 \times 42 / 25 \times 42 = 8/5$  – общее передаточное отношение от раскладчика нити к паковке.

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{v_H}{v_O} = h_k / \pi D i_o = 40 \times 42 / 25 \times 42 = 8/5$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = 2 \times 250 \times 5 / 8 \times 28 \times 8 = 0,444, \quad \frac{\beta}{2} = 24^\circ \text{ и } \beta_{\max} = 48^\circ.$$

При формировании сомкнутой намотки [97] передаточное отношение определится по формуле:

$$i_{oc} \approx \frac{(Z + n_1 \cdot p)}{k(p \pm \frac{d}{2H})} \quad (6.11)$$

Где  $Z = 0$  или  $1$  – кратность замыкания намотки.

Поскольку  $i_{oc} = 8i/5$ , то

$$8i/5 \approx \frac{(Z+n_1 \cdot p)}{k(p \pm \frac{d}{2H})}, \quad (6.12)$$

Решая уравнение 6.11 относительно  $i$ , и принимая  $Z=0$  или  $1$  – кратность замыкания намотки;  $d=1$  мм;  $n_1=12$ ;  $P=1$  и  $H=250$  мм, получаем:

$$i \approx \frac{(1+12 \cdot 1)}{8(1 \pm \frac{1}{2 \times 250})} 5/8 = 1,014, \text{ а } i_{oc} = I \cdot 8/5 = 1,622.$$

Тогда  $\psi_{1,p+1} = 360 \cdot 1(8 \cdot 1,622 - 12) = 360 \cdot 0,976 = 351,36 (-8,64^\circ)$ ,

а требуемое значение, угла сдвига витков [64]  $\psi_c = 2d/D (\sin \beta/2)$ ,  
 $\beta_{\max} = 48^\circ$ .

$$\psi_c = 2 \times 1/28 \times 0,47 \times 189/\pi = 8,95^\circ.$$

Угол скрещивания витков  $\beta$  составит:

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = 2H/\pi k D i_o = 2 \times 250 \times 5 / 3,14 \times 8 \times 28 \times 8 = 0,144.$$

$\frac{\beta}{2} = 24^\circ$ , а  $\beta = 48^\circ$ , что соответствует заданным параметрам.

Коноидный вариатор 7 позволяет корректировать величину общего передаточного отношения от раскладчика нити к мотальной паковке (оправке), в зависимости от величины условного диаметра наматываемой нити –  $d$ , (или ширины жгута  $b$ ).

После завершения процесса намотки заданного числа слоёв базовой сомкнутой структуры -  $\lambda_1$ , переход к формированию каркасных слоёв замкнутой структуры требует внесения изменений в кинематическую схему мотального механизма. Для этого отключается коноидный вариатор 7 и вводится в зацепление шестерня («паразитная»)  $Z_6$ . Это необходимо делать для того, чтобы исключить

проскальзывание ремня по коноидам вариатора и обеспечить «жёсткую» передачу от раскладчика нити к мотальной паковке. Постоянство величины передаточного отношения  $i_{oz}$ , в данном случае, обеспечивает формирование устойчивой структуры замкнутых намоток с расчетными значениями размеров пор в течение всего периода формирования каркасных слоёв толщиной -  $\lambda_2$ .

Требуемые размеры пор, показанные на рисунке 2.6 формирующиеся в структуре замкнутых намоток определяются по формулам:

$$f = 2H / n_1 p \quad (6.13)$$

и

$$b = \pi D / p \quad (6.14)$$

**Пример** расчета параметров настройки мотального механизма, требуемых для формирования слоисто-каркасной структуры намотки, при следующих условиях:  $d=1\text{мм}$ ;  $n_1=12$ . Размер диагоналей пор в начале наматывания паковки:  $f = (5-5,5)\text{мм}$ ;  $b = (10-12)\text{мм}$ . А степень замыкания намотки  $p = 8$ ,

тогда:  $f = 2 \times 250 / 12 \times 8 = 5,1\text{мм}$ ; а  $b = \pi 28 / 8 = 11\text{мм}$ .

Величина передаточного отношения от раскладчика нити к паковке [60] определяется по формуле:

$$i_{oz} = 1/\kappa (z/p - n_1) \quad (6.15)$$

тогда  $i_{oz} = 1/8(1/8 - 12) = 98/64 = 49/32 = 1,576$ . Данное передаточное отношение может быть обеспечено шестернями  $Z_5 = 49$  зубьев и  $Z_7 = 32$  зуба.

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{2H}{\pi \kappa D i_0} = \frac{2 \cdot 250}{\pi \cdot 8 \cdot 28 \times 97} = 0.454 \quad (6.15)$$

$\frac{\beta}{2} = 24^\circ$ , а  $\beta = 48^\circ$ , что совпадает с углом скрещивания витков базовых слоев, формируемых сомкнутой намоткой.

По завершении процесса формирования каркасных слоев намотки заданной толщины  $\lambda_2$ , возможно вновь вернуться в первоначальной кинематической схеме привода раскладчика нити, через вариатор, отключив шестерню  $Z_6$ . Тогда начнут

формироваться новые слои сомкнутой структурой намотки, создавая базу для формирования второго каркаса и т.д.

В разделе 2, на рисунке 2.7.а) и рисунке 2.11 приведены фото сомкнутой и замкнутой намоток, сформированных по заданным расчетам приведенного примера.

Структура слоисто-каркасных намоток позволяет использовать их в качестве интеллектуальных, многофункциональных наполнителей, причем чередование сот, образуемых замкнутой намоткой, и каркасов высокой плотности, дают возможность заполнения пористого объёма дополнительными армирующими элементами, придающими конечным изделиям дополнительные особые свойства.

### **6.3. Разработка технологии армирования волокнистых полимерных композиционных фильтров для очистки и обеззараживания воздуха**

Существующие в настоящее время системы очистки и обеззараживания воздуха, подаваемого в социально значимые объекты, остро нуждаются в получении новых, высококачественных и эффективных фильтровальных материалах [96].

В настоящее время, в ряде стран, проводится исследования по созданию фильтров тонкой очистки воздуха, воды и газов на базе волокнистых полимерных композиционных материалов. Примерами таких фильтров являются фильтры для тонкой очистки и увлажнения воздуха Philips типа HU4801. Изображение данного фильтра показано на рисунке 6.7



Рисунок 6.7 — Фильтровальный материал Philips.

В рамках проводимых исследований была разработана новая технология создания композиционных волокнистых фильтровальных перегородок, а так же разработаны структуры композиционных волокнистых фильтров, исключающих смятие фильтровальных перегородок при больших перепадах давления. Композиционные фильтры формируются из комплексных нитей со специфичными свойствами (биоцидными), на базе различных структур намотки. Технологии их производства включает в себя ряд последовательных операций:

- 1) Придание мультифиламентным текстурированным комплексным нитям (углеродным, вискозным, полипропиленовым) специальных антисептических свойств;

- 2) Формирование бикомпонентных комплексных нитей (углерод-полипропиленовых, углерод-вискозных), путём их трощения или скручивания, обмотки стержневой нити с нитью иной природы («сопутствующей нитью») в единую комплексную нить;

3) Формирование композиционных фильтровальных перегородок однопроцессным способом, намоткой комплексной нити, на перфорированные патроны заданных типоразмеров.

4) формирование требуемой структуры и заданного послойного расположения комплексных нитей с различными свойствами в одной фильтровальной перегородке;

5) формирование требуемой прочности структуры фильтровальной перегородки, устойчивой к воздействию внешних сил (смятия от избыточного давления, приводящего к её «пробою» - разрыву), осуществляется за счёт создания прочной композиционной структуры, состоящей из точечно проклеенных связующим, каркасных (углеродных) нитей;

6) создание фильтровальных картриджей требуемых размеров (диаметра и высоты намотки).

Технологический процесс формирования фильтровальных перегородок композиционных текстильных фильтров существенно не отличается от традиционных способов формирования мотальных паковок. На рисунке 6.8 показана технологическая схема заправки мотальной машины нитевидных материалов, обладающих специфичными антимикробными свойствами на перфорированный патрон, при формировании выпускной мотальной паковки в виде воздухоочистительного картриджа.

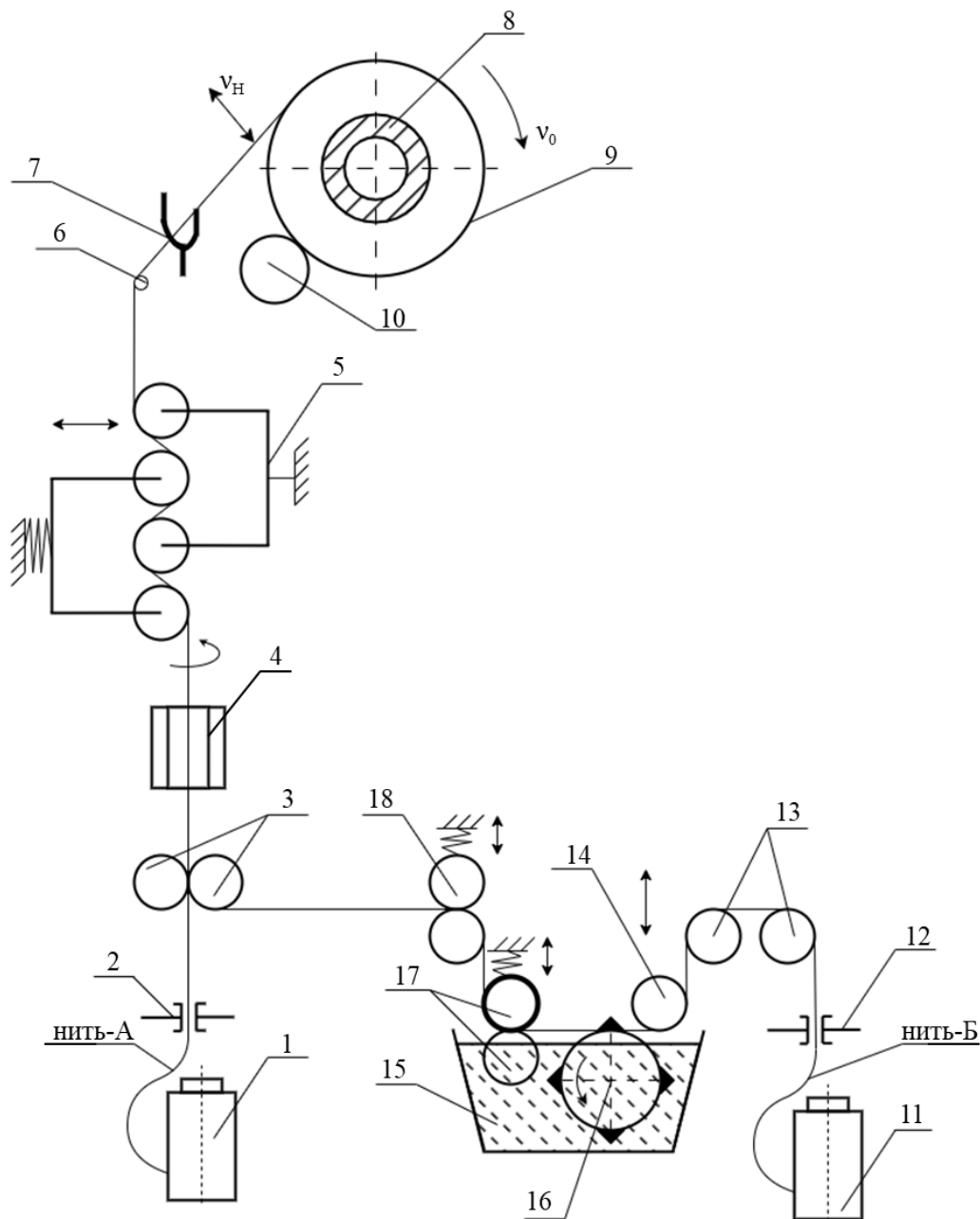


Рисунок 6.8 — Технологическая схема заправки, нити или нитевидных материалов при формировании композиционных текстильных фильтров.

Как показано на рисунке 6.8 комплексная нить формируется трощением вязкой-А и углеродной- Б нитей, сматываемых с неподвижных питающих паковок 1 и 11. При этом нить А проходит через глазки баллоноограничителей 2 и ролики 3 в зону трощения 4. Нить-Б, проходит через прутки баллоноограничителей 12, направляющие ролики 13 и погружным валиком 14, имеющим регулируемую

степень погружения нити в емкость с связующим 15. Процесс нанесения связующего на углеродную нить может осуществляться несколькими способами:

- а) полным погружением нити в связующее на заданную глубину;
- б) точечным нанесением связующего на нить, с помощью профильного валика 16 в местах контакта его с нитью.

Далее нить Б поступает в отжимные валы 17, верхний из которых подвижен и его поверхность обрешинена. Степень отжима нитей регулируется с помощью изменения силы прижима верхнего валика к нижнему, (пружинным механизмом). Контроль степени отжима и выравнивание натяжение нити Б, перед её подачей в зону трощения, производится с помощью демпфирующих роликов 18. Формирование комплексной вискозно-углеродной нити осуществляется в крутильной платформе 4. Далее комплексная нить проходит через натяжной прибор 5 гребёночного типа, позволяющий стабилизировать натяжение нити в зоне формирования намоточного фильтровального слоя мотальной паковки заданной структуры 9. Намотка и раскладка нити, (или нитевидного материала - жгутов) осуществляется после ее прохождения через компенсирующий прут 6 и раскладчиком нити 7 перемещается вдоль образующей паковки (фильтровального картриджа), наматывается на перфорированный (сетчатый) патрон 8.

Отличительной особенностью данной технологии является возможность объединения, или чередования структур намоток фильтровальных перегородок на перфорированных патронах, формируемых слоями намоток заданной структуры.

Таким образом, появляется возможность создавать слоисто-каркасные структуры из фильтровальных материалов с различными свойствами, например, очистки и обеззараживания воздуха на различных слоях перегородки. Кроме того, выбираемый вид нитей, заданная пористость и воздухопроницаемость структуры, а так же компоновка количества слоёв, того, или иного материала в единой системе, позволяют достигать требуемых показателей степени очистки воздуха.

Формирование слоисто-каркасных структур фильтровальных перегородок из комплексных нитей (неравномерных по диаметру), на базе сомкнутых намоток,

требует использования специального мотального оборудования, включающего, кроме механизмов намотки и раскладки нитей (нитевидного материала), устройства, которые позволяли бы изменять структуру формируемых паковок. Таким механизмом является коноидный вариатор, позволяющий плавно изменять передаточное отношение от раскладчика нити к паковке с помощью перемещения ремня по коноидным роликам  $d_1$  и  $d_2$ . Кинематическая схема, одной из таких конструкций, приведена на рисунке 6.8. Мотальная паковка – картридж фильтра, диаметром  $D_0$  устанавливается на вал 1, получающий вращение от электродвигателя, через пару прямозубых шестерён  $Z_1, Z_2$  и цепную передачу  $Z_3, Z_4$ . Раскладка комплексной нити на мотальной паковке осуществляется раскладчиком, получающим возвратно-поступательное движение вдоль образующей паковки 1 с помощью прорезного (сменного) кулачка. На кулачке, для перемещения раскладчика нити, нанесена замкнутая винтовая канавка с числом витков  $k$ . Размеры кулачка и число витков пазовой канавки определяют такие важные параметры структуры намотки, такие как высота раскладки  $H$  и угол скрещивания витков  $\beta$ . Как было показано ранее, данные параметры структуры определяют начальные значения размеров пор (ромбов, диагоналей параллелепипедов).

Пример оптимизации технологических параметров настройки мотального оборудования, для формирования заданных структур намотки (сомкнутой, слоисто-каркасной, замкнутой), проведём на мотальном механизме, кинематическая схема которого представленном на рисунке 6.9.

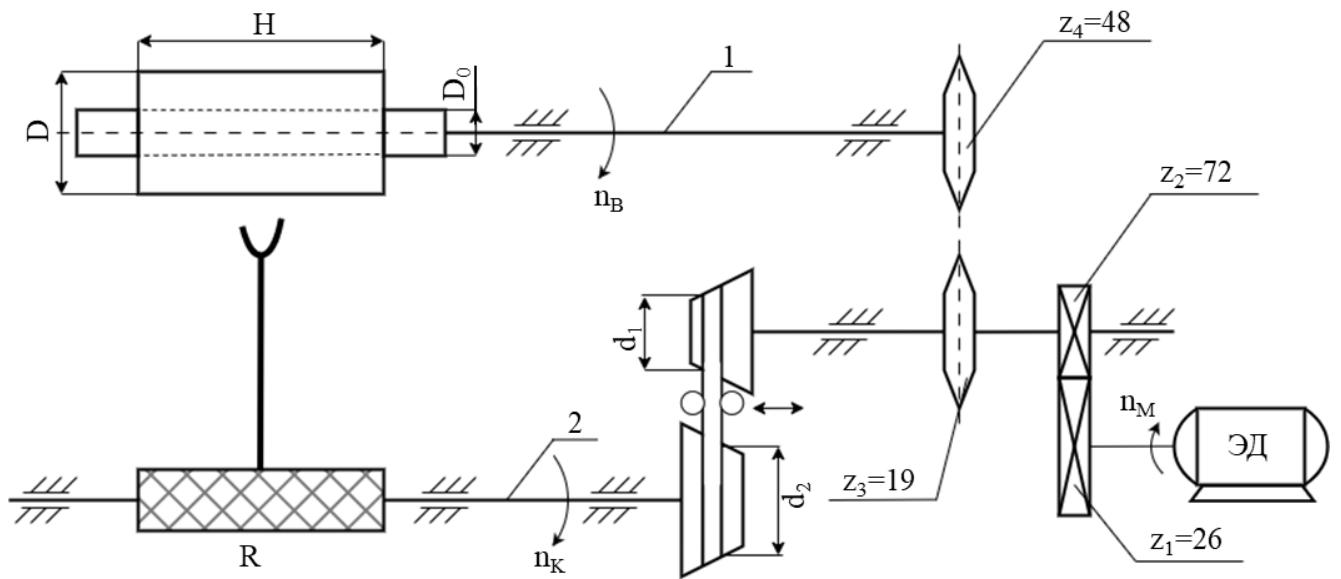


Рисунок 6.9 — Кинематическая схема моторного механизма для формирования слоисто-каркасных намоток.

Пусть необходимо сформировать фильтровальную перегородку на перфорированном патроне из комплексных нитей с условным диаметром нити  $d_n = 2,5$  мм, сомкнутой структурой намотки, с углом скрещивания витков  $\beta$  в пределах  $30-50^\circ$ .

Для формирования на патроне сомкнутой структуры намотки с заданными параметрами, проведём расчет и укажем пути оптимизации технологических параметров моторного механизма.

Исходные данные для расчетов заданного значения угла скрещивания витков в начале намотки фильтровальных картриджей:

1.  $N_m = 1000$  об/мин; - число оборотов ротора электродвигателя;
2.  $D_0 = 100$  мм – диаметр сетчатого перфорированного патрона, с ячейками  $10 \times 10$  мм, для формирования картриджа;
3.  $h_k = 50$  мм – шаг канавки пазового кулачка раскладчика нити;
4.  $H = 20$  мм, при  $k=8$ , число витков канавки пазового кулачка раскладчика нити;

5.  $i = \frac{d_1}{d_2} \approx 1$  передаточное отношение коноидного вариатора.

Диапазон изменения величины передаточного отношения коноидного вариатора ( $0.9950 \leq i \leq 1.005$ ).

б.  $i_o = n_b / n_r$  — общее передаточное отношение от веретена к кулачку нитераскладчика.

Для формирования на патроне сомкнутой намотки с углом скрещивания витков  $\beta$  в пределах  $30-50^\circ$ , при условном диаметре комплексной нити  $d_n = 2,5$  мм.

Расчет требуемых параметров, обеспечиваемых данным мотальным механизмом:

а) расчет угла скрещивания витков:

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{V_H}{V_O} = \frac{h_{knk}}{\pi D n_b} = \frac{0,05}{3,14 \cdot 0,1 \cdot 0,39} = 0,41 \approx 22^\circ \text{ и } \beta = 44^\circ. \quad (6.16)$$

б) расчет величины передаточного отношения между паковкой и раскладчиком нити, которое обеспечит формирование сомкнутой намотки и её производных (слоисто-каркасной и замкнутой) структур. Для этого определим частоту вращения веретена по формуле:

$$n_b = n_m \frac{Z_1}{Z_2} i = 960 \frac{26}{72} i \quad (6.17)$$

$$n_k = n_m \frac{Z_1}{Z_2} \frac{d_1}{d_2} = 960 \frac{26 \cdot 1}{72} \approx 346,6 \text{ об/мин.}$$

Требуемая величина общего передаточного отношения:

$$I_o = \frac{n_b}{n_k} = \frac{142,5}{346,6} = 0,41. \quad (6.18)$$

Требуемый, для формирования сомкнутой структуры намотки из комплексных нитей, угол сдвига между витками различных пар слоёв намотки определяется по формуле 2.1 профессора Гордеева В.А.:

$$\Psi_c = \frac{2d}{D \sin \frac{\beta}{2}}, \quad (6.19)$$

где:  $\Psi_c$  — угол сдвига витков, необходимый для формирования сомкнутой структуры намотки комплексных нитей заданной линейной плотности (заданного условного диаметра);

$\underline{d}$  – условный диаметр комплексной нити ( $d = \frac{c}{\sqrt{N}}$ , мм),

$c$  - объёмная плотность комплексной нити (характеризующая материалы нитей, из которых она изготовлена);

$N$ - номер комплексной нити (м/г) или величина, обратная линейной плотности нитей в тексах (г/км) ,

Проведем расчет фактического значения угла сдвига витков, создаваемого мотальным механизмом по формуле 6.19.

Из выражения 6.19 следует, что для сохранения постоянства угла сдвига витков ( $\Psi_c = \text{const}$ ) или сохранения стабильной структуры намотки фильтровальной перегородки при увеличении диаметра намотки  $D$ , угол скрещивания витков  $\beta$  должен, как отмечалось ранее, уменьшаться пропорционально.

В общем виде угол сдвига витков для получения сомкнутой структуры определяется выражением:

$$\Psi_{m,m+p} = 2\pi p(ki_{oc} - n_1) \quad (6.20)$$

где  $i_{oc} = \frac{n_B}{n_k}$  - общее передаточное отношение;

$n_1 = [ki_o]$  - целая часть числа.

Расчет фактического значения величины передаточного отношения от веретена к раскладчику нити для «опережающей» сомкнутой структуры намотки производится по формуле: При условии:  $p=1; n_1 = 3; Z = 1; d_H = 2,5 \text{ мм}$ .

$$i_{oc1} = \frac{Z+n1p}{k\left(P \pm \frac{d}{2H}\right)} = \frac{1+3 \cdot 1}{8\left(1 \mp \frac{2,5}{2 \cdot 200}\right)} = 0,49 \quad (6.21)$$

Аналогичным расчетом для «отстающей»:

$$i_{oc2} = 0,503.$$

Угол сдвига витков определяется по формуле 9:

$$\Psi_{1,2} = 360 \cdot 1(8 \cdot 0,49 - 3) = 331,2, \text{ или } 290;$$

Для отстающей сомкнутой намотки угол сдвига составит:

$$\Psi_{1,2} = 360 \cdot 1(8 \cdot 0,5 - 3) = 360 \text{ градусов. Т.е. угол сдвига равен нулю.}$$

Очевидно, что в данном случае на паковке будет формироваться замкнутая (сотовая, пористая) структура.

Для формирования сомкнутой структуры необходимо выполнение условия:

$$\Psi_{m,m+p} = \Psi_c, \quad (6.22)$$

Расчет угла сдвига витков, необходимого для формирования сомкнутой намотки по формуле 6.35 показывает, что:

$$\Psi_c = \frac{2d}{D \cdot \sin \frac{\beta}{2}} = \frac{2 \cdot 2,5}{100 \cdot 0,3} = 17^\circ \quad (6.23)$$

Подставляя в формулу 6.21 данные, соответствующие исходным параметрам и решая его, получим значение величины передаточного отношения от паковки к раскладчику нити, которые обеспечат формирования сомкнутой «опережающей» и «отстающей» структур из применяемых комплексных нитей, формирующих фильтровальную перегородку композиционных фильтров.

Корректировку величины передаточного отношения расчетного и фактического, можно производить с помощью коноидного вариатора, изменяя величину передаточного отношения:  $i = d_1 / d_2$ , включенного в конструкцию разработанного механизма специального назначения, что позволит использовать нити различной линейной плотности (условного диаметра).

Разработанная технология позволила создать композиционные фильтры для очистки и обеззараживания воздуха в социально-значимых объектах и местах массового скопления людей. Фото композиционных фильтров показано на рисунках 6.10.а) и 6.10.б).



Рисунок 6.10 — а) Фото композиционного фильтра рамочного типа для очистки и обеззараживания воздуха.



Рисунок 6.10 — б) Фото композиционного фильтра коллекторного типа для очистки и обеззараживания воздуха.

Материалы по созданию композиционных фильтров представлены в Приложении 2 - 5. (Протоколы испытаний фильтров, технические условия, технологическая карта производства, фотографии опытных образцов фильтров трех типов).

#### **6.4. Перспективные направления развития новых технологий армирования композиционных материалов, в том числе с применением структур 3D намотки**

Интенсивное развитие всех отраслей промышленного производства вызывают потребность в создании новых конструкционных композиционных материалов со специфичными свойствами.

Так, например, создании новых материалов для авиации, судостроения, металлургии требует от ученых разработки новых подходов [98, 99]. Традиционные технологии технического текстиля и материалов, в виде нетканых полотен и тканей, трикотажа, плетения, намоток, получаемых на основе дискретных и/или непрерывных волокон различной природы, до сих пор используются как индивидуальные процессы.

Для расширения гаммы композиционных материалов плоской пространственной форм во всем мире начинают развиваться исследования, связанные с объединением нескольких технологий армирования в единую, направленную на использование всех преимуществ, присущих отдельным технологиям. Ярким примером такого подхода является разработка 3D намоток, которая объединяет процессы формирования тканых структур с намотками, с целью использования их индивидуальных положительных свойств, а именно одновременного формирования из нескольких систем нитей объёмных высокоплотных структур с сохранением прочностных характеристик армирующих волокон, при заданной их ориентации в объёме конечного продукта. Свою работоспособность и эффективность показали процессы объединения технологий ткачества и нетканых материалов иглопробивным способом, при получении высокопрочных заготовок тормозных дисков для авиации [100].

В данном направлении исследований разработан и способ формирования «фальш-намоток», плоских тонкостенных протяженных полотен, который заключается в использовании 3D намоточных ткацких или вязальных (по типу технологии «Метап»). Данная «объединяющая» технология выполняется на специальном оборудовании, которое позволяет формировать плоские текстильные армирующие полотна заданной ширины и длины. На данный способ формирования получен патент № RU 2 574 802 C2 Способ создания плоских нетканых полотен.

Целью разработки данного способа является изыскание возможностей практического использования всех преимуществ намоток и тканей перед многостадийными процессами создания отдельно тканых и нетканых полотен.

Данный способ обеспечивает упрощение и удешевление процесса изготовления плоских нетканых полотен и изделий из них с заданной структурой и требуемыми размерами. На рисунке 6.11. показана технологическая схема процесса формирования «фальш-намотки» на специальном оборудовании.

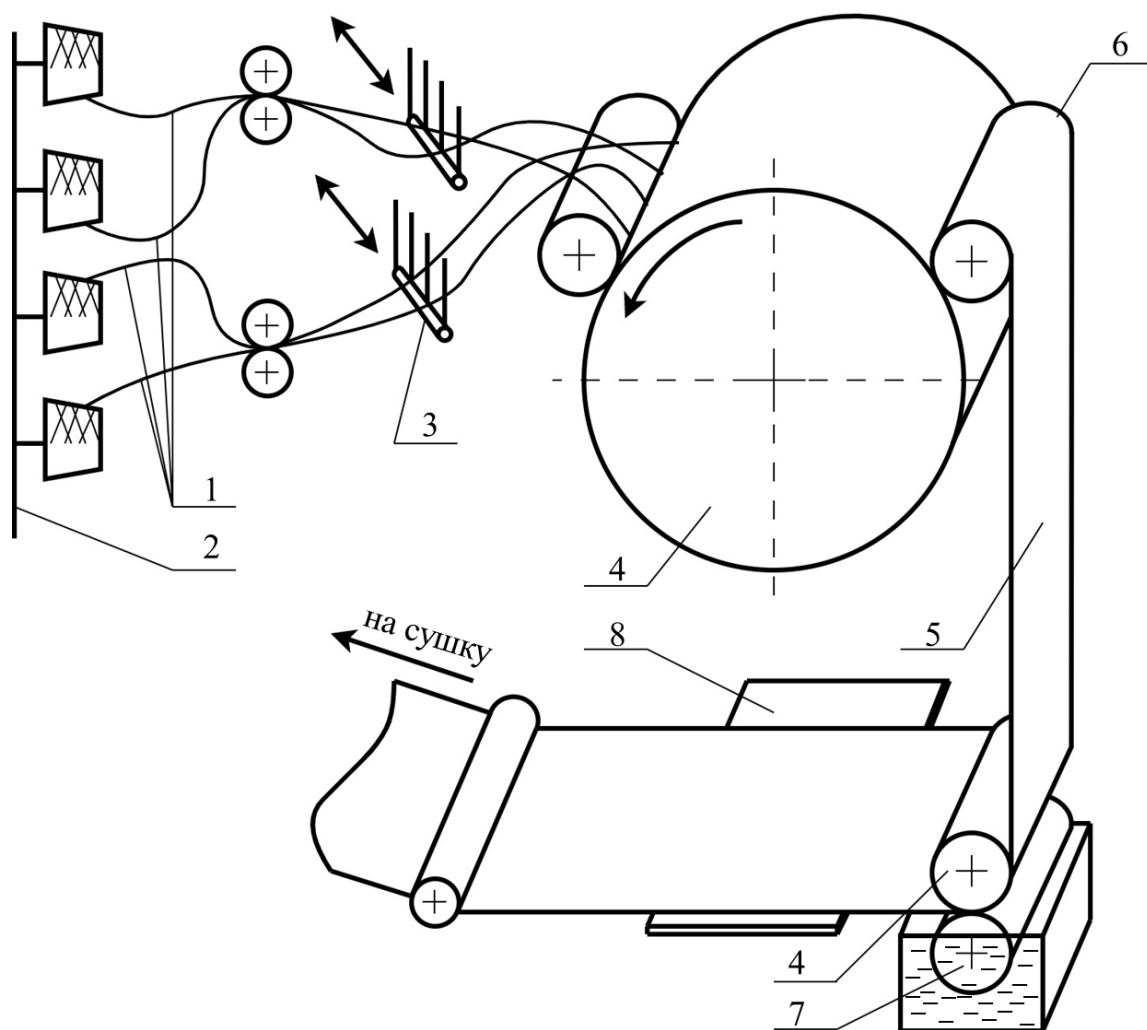


Рисунок 6.11 — Технологическая схема процесса формирования «фальш-намотки».

Разработанный способ создания плоских, объемных нетканых полотен заключается в следующем.

Нити 1 сматывают со шпуляника 2, гребенками 3 асинхронно перемещают в горизонтальной плоскости навстречу друг другу, наматывают на вращающийся барабан 4, причем только на заданную часть его периметра, образуют нетканое плоское 5 полотно заданной структуры - («фальшнамотку»), затем плоское нетканое полотно отводят от барабана 4 направляющими валами 6 в ванну со связующим 7 и далее в сушильную часть 8.

При реализации этого способа может быть применено несколько чередующихся между собой слоев непрерывных нитей и полотен из волокон различной природы

В результате реализации разработанной технологии однопроцессным способом – «фальш-намоткой» нитей различной природы на барабан, создаются протяженные нетканые полотна заданной структуры и требуемых размеров (толщина, ширина и длина).

Данный способ с использованием преимуществ 3D намоток при формировании плоских полотен в виде «фальш-намотки», относится к процессам создания непрерывных текстильных полотен и может быть использовано при формировании легких армирующих компонентов композиционных материалов (по типу нетканых полотен).

#### **6.5. Новая технология получения углерод - углеродных материалов методом построения разверток намоток на плоскость**

Впервые в работе при изучении структур и процесса формирования намоток мотальных паков для изготовления углерод – углеродных материалов получены новые многослойные и толстостенные конструкционные композиционные материалы путем развертки многослойных намоток заданной структуры на плоскость.

Технологии армирования толстостенных композиционных материалов методом развёрток намоток мотальных паков имеет ряд преимуществ и способна заменить в ряде случаев многослойные ткани [101, 102]. И для изготовления

изделий различного назначения может рассматриваться как альтернативная, технологии ткачества по следующим причинам:

1. Заполнение углеродной матрицей межфиламентного пространства структуры композита, армируемого сомкнутыми намотками, за счёт более уплотнённого расположения филаментов выше, чем у тканых структур [103].
2. Углеродное волокно трудно перерабатывается в ткачестве в связи с очень малым удлинением при разрыве – до 1% и ломкостью самих филамент при изгибной или знакопеременной нагрузке. Это приводит к тому, что остаточная прочность углеродного волокна в конечном изделии может снижаться до 50% от исходной;
3. В процессе формирования тканей углеродные нити подвергаются многократному истирающему воздействию о направляющие рабочие органы ткацкого станка (глазки галев ремизок, бердо, и т.д.) и друг о друга, что снижает их прочностные характеристики.
4. Процесс формирования тканых структур требует выполнения большого числа подготовительных операций (перемотка, сновка или аппретирование нитей) в течение которых углеродные волокна подвергается многократному растяжению и истиранию, при которых теряется их механическая прочность. Если производителем ставится задача формирования прочных к разрыву по утку армирующих тканых структур, то этого можно добиться только, вырабатывая ткани с натуральной кромкой на механических челночных ткацких станках (не закладной или обрезной), а не бесчелночных «рапирных». В этом случае подготовка уточных паковок из углеродных нитей требует особого специфического оборудования и специальных знаний по их формированию. Однако до настоящего времени, такого оборудования в нашей стране не выпускается;
5. Производительность ткацкого станка значительно ниже производительности мотального оборудования, ввиду однопроцессного способа формирования заготовок намоткой.

Апробация предлагаемой технологии получения разверток для формирования перспективного материала взамен известным текстильным

технологиям реализована с использованием намоточного станка РПН – Н – 1200 – станок радиально – перекрестной намотки. Получена развертка сомкнутой намотки с коэффициентом заполнения более 0,7 на базе перспективного углеродного волокна UMT – 12K – EP.



Рисунок 6.12 — Развертка сомкнутой намотки волокна UMT – 12K.

Полученный углерод – углеродный материал методом развертки намотки имеет начальную плотность в 1,3 раза выше в сравнении с другими серийно выпускаемыми УУКМ АО «НИИГрафит».

Сравнительная анализ физико - механических характеристики углерод - углеродных композиционных материалов (Таблица 6.1) отражает значительный потенциал использования разверток намоток в качестве изделий различного назначения, в том числе конструктивных элементов и нагревателей

высокотемпературного оборудования. Протоколы испытаний УУКМ развертки представлены в Приложении 6.

Таблица 6.1

|                                             | Сжатие,<br>МПа | Теплопроводность,<br>Вт/(м*К) | Электросопротивле<br>ние,<br>Ом * мм <sup>2</sup> /м | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> |
|---------------------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------|
| УУКМ<br>развертка                           | 272            | 55,7                          | 17,9                                                 | 1,87                            |
| УУКМ на<br>основе<br>стержневых<br>структур | 183,3          | 44,7                          | -                                                    | 1,93                            |

Преимущества разработанной перспективной технологии:

1. Разработанная технологии армирования 2D и 2,5D углерод - углеродных композиционных материалов методом развёрток намоток мотальных паковок может успешно использоваться для получения изделий значительной толщины, при этом обеспечивается максимальное заполнение объёма композита волокнистым армирующим компонентом и углеродной матрицей, т.е. с максимальным коэффициентом заполнения.

2. Использование сомкнутых структур намоток с различной степенью замыкания, применяемых в качестве базы для получения разверток, значительно расширяет гамму создаваемых изделий и расширяет области их использования.

3. Однопроцессный способ формирования армирующих композиционные материалы структур, и при этом минимальное механическое воздействие на углеродные нити, обеспечивает сохранение целостность волокон нити и их механическую прочность в готовом изделии.

4. Использование разверток намоток мотальных паковок при армировании композиционных материалов позволяет значительно снизить трудозатраты на их производство.

## Выводы по главе 6

1. Задача создания современных углерод-углеродных и полимерных композиционных материалов с требуемыми параметрами может быть успешно решена при использовании сомкнутых, замкнутых и спиралевидных 3D намоток различной степени замыкания, которые вносят в конечные изделия большое разнообразие новых, специфичных и полезных свойств.

2. Проведённый сравнительный анализ применяемых в промышленности систем армирования фрикционных материалов показал, что разработка новых способов армирования наполненных полимерных и углерод-углеродных композиционных материалов может быть проведена на базе сомкнутых намоток мотальных паковок увеличенных габаритов.

3. Выбор вида сомкнутой намотки углеродных нитей и угла скрещивания витков позволяют обеспечивать максимальное и равномерное проникновение углеродной матрицы в структуру намотки, что будет способствовать повышению прочностных характеристик и требуемых параметров, необходимых фрикционным материалам, работающим в критических условиях.

4. Проведенные исследования слоисто-каркасных намоток позволили разработать технологию и оборудование для создания композиционных волокнистых фильтровальных перегородок из комплексных нитей со специфичными (биоцидными) свойствами. Данные фильтры могут использоваться в местах массового скопления людей в их присутствии, (так как не выделяют вредных веществ и ультрафиолетовых излучений).

5. Развитие новых технологий армирования композиционных материалов плоской и пространственной форм, связаны с объединением нескольких текстильных технологий в единую, направленную на использование всех

преимуществ присущих им, на получение композиционных материалов с новыми свойствами.

6. Использование разверток намоток при армировании композиционных материалов позволяет значительно снизить трудозатраты на их производство.

## Общие выводы и рекомендации

1. Анализ процессов армирования композиционных материалов с использованием различных текстильных технологий показал, что армирование композитов намоточными структурами, является самым «коротким» (однопроцессным) способом формирования конечных изделий с требуемыми технологическими параметрами, а именно, с максимальным заполнением объема композита волокнистым наполнителем, требуемых форм и размеров, при минимальных затратах дорогостоящего сырья.

2. Критерием оценки эффективности производства композиционных материалов с заданными свойствами (прочностными, температурными) и требуемых типоразмеров, является себестоимость выпуска единицы продукции (композита и его элементов), которая, прежде всего, определяется стадийностью технологических процессов, трудоёмкостью их производства и понесенными сырьевыми и энергозатратами.

3. Установлено, что армирование композиционных материалов намоточными структурами, является самым «коротким» (однопроцессным) способом формирования композитов с требуемыми технологическими параметрами, а именно с максимальным заполнением объема композита волокнистым наполнителем, требуемых форм и размеров.

4. Главным параметром, определяющим все виды структур намоток мотальных паковок, является угол сдвига витков  $\psi_{1,p+1}$ , между различными парами слоёв намотки. В зависимости от величины угла сдвига витков, структуры намоток мотальных паковок специального назначения, подразделяются на три основные группы: сомкнутые, замкнутые, спиралевидные и их производные, которые возможно применять в качестве наполнителей композиционных материалов различного назначения.

5. Намотки сомкнутой структуры и их производные, обладают максимально возможной, (по сравнению со всеми иными структурами наполнителей композитов) удельной плотностью намотки, причем, постоянной, как в осевом, так и в радиальном направлениях паковки.

6. Структуры сомкнутых намоток отличаются друг от друга по степени замыкания намотки- $p$  и взаимному расположению витков намотки при их формировании, делятся на «опережающие» и «отстающие», данные особенности структур сомкнутых намоток приобретают особое значение при формировании наполнителей (армирующих заготовок) композиционных материалов, которые будут подвергаться большим внешним нагрузкам, действующим по известным направлениям.

7. Намотки замкнутой структуры являются фундаментальными, так как на их основе строятся множество производных структур «опережающих» и «отстающих» с той же степенью замыкания  $p$ , они имеют пористую (ячеистую) структуру, размеры пор определяются степенью замыкания намотки, которая может задаваться расчетным путем, что позволяет использовать их в инжиниринге композитных материалов, при выборе соотношения долей наполнителя и связующего.

8. Намотки спиралевидной структуры нитей на оправки характеризуются тем, что у «опережающих» намоток поры смещаются на заданную величину в каждом последующем слое намотки, относительно предыдущего, по ходу часовой стрелки, а у «отстающих», наоборот, против хода часовой стрелки. Это свойство спиралевидных структур намотки целесообразно использовать при формировании фильтровальных перегородок специального назначения и армирующих компонентов цельных композитов винтовой формы (корабельные винты, шнеки, турбины, лопасти летательных аппаратов и т.д.).

9. Армирующие композиционные материалы структуры, формируемые на базе 3D намоток, являются новым конструкционным материалом, обладающим высокой прочностью и устойчивостью к сдвигу и расслоению витков при

приложении к ним больших внешних нагрузок, что обеспечивается высокой связанностью систем базовых и перевивочных нитей.

**10.** Прецизионные структуры 3D намоток, могут формироваться из нитей различной природы и различной линейной плотности, что открывает большие перспективы создания композиционных материалов с новыми, наперед заданными свойствами.

**11.** Структуры 3D намоток могут формироваться на паковках заданной формы и кривизны образующей поверхности, с максимально высоким коэффициентом заполнения структуры армирующим компонентом, при этом обеспечивая заданную ориентацию волокон (до пяти направлений).

**12.** Исследование структур намоток мотальных паковок и их свойств, целесообразно проводить построением разверток намотки на плоскость, что позволяет определять взаимное расположение волокон в структуре наполнителя и оптимизировать ее, что особенно важно, при конструировании композиционных материалов с заданными направлениями приложения внешних нагрузок на готовое изделие.

**13.** Развертки намоток мотальных паковок на плоскость позволяют успешно использовать их для армирования плоских и профильных толстостенных композиционных материалов. Использование разверток намотки паковок (тел вращения), полученных секущими плоскостями различного направления, можно получать множество профильных изделий (армирующих заготовок для выкладки в прессформы), с высоким коэффициентом заполнения, заданной толщины и требуемой ориентации волокон в структуре композита.

**14.** При армировании композиционных материалов различного назначения (заданной формы и размеров), долевое содержание наполнителя и связующего в общий объем композиционного материала, можно регулировать выбором структуры 3D намотки (замкнутой, сомкнутой, слоисто-каркасной, спиралевидной).

**15.** При производстве разверток намоток на плоскость, формируемых из углерод-углеродных композиционных материалов, предназначенных для производства конструктивных элементов и нагревателей высокотемпературного оборудования, можно контролировать и задавать свойства конечного изделия за счет формирования исходных намоточных структур с требуемыми технологическими параметрами.

**16.** При формировании армирующих заготовок углерод-углеродных материалов, выбор пористых структур намотки углеродных нитей на оправку, позволяет получить максимальное и равномерное проникновение углеродной матрицы в структуру намотки и межфиламентное пространство. Это способствует повышению заполнения объема заготовок углеродной матрицей (с возможными присадками), а, следовательно, повышению прочностных характеристик готовым изделиям, например, фрикционным материалам, работающим в критических условиях.

**17.** Использование крестовых сомкнутых 3D намоток в качестве наполнителя заготовок фрикционных материалов, их «рабочая поверхность» будет состоять из срезов непрерывных углеродных волокон, расположенным под заданным углом скрещивания витков, что обеспечит направленный отвод тепла из зоны трения и высокие прочностные свойства фрикционного материала.

**18.** Разработанная технология создания композиционных фильтров для очистки и обеззараживания воздуха, формируемых на базе различных структур 3D намотки мотальных паковок, позволяет существенно расширить области использования композиционных материалов в обеспечение экологической безопасности человека.

#### **Рекомендации:**

1. Критерием выбора технологии армирования и оценки эффективности производства композиционных материалов с заданными свойствами (прочностными, структурными и конструктивными), являются качество конечных изделий и себестоимость выпуска единицы продукции. Себестоимость,

в свою очередь, определяется: стадийностью технологических процессов, трудоёмкостью производства, стоимостью используемого оборудования, понесенными сырьевыми и энергозатратами.

2. Исследование структур намоток мотальных паковок и их свойств, целесообразно проводить построением разверток намотки на плоскость, что позволяет определять взаимное расположение волокон в структуре наполнителя и оптимизировать ее, что особенно важно, при конструировании композиционных материалов с заданными направлениями приложения внешних нагрузок на готовое изделие.

3. Использование разверток 3D намоток мотальных паковок (тел вращения), полученных секущими плоскостями различного направления, можно получать множество профильных изделий (армирующих заготовок для выкладки в прессформы), с высоким коэффициентом заполнения, заданной толщины и требуемой ориентацией волокон в структуре композита.

4. При армировании композиционных материалов намотками произвольной формой необходимо выполнение условия равновесности витков на поверхности паковки, и условия наполнения объёма изделия армирующим наполнителем, когда для любого участка намотки, в направлении оси паковки, произведение толщины намотки на удельную плотность и осевую скорость перемещения нити является постоянной величиной.

5. Для формирования армирующих структур намотками различного вида, в том числе и 3D намоток, целесообразно использовать специальное мотальное оборудование с ЧПУ, адаптированное для каждого конкретного изделия. В конструкции мотального оборудования, должны учитываться основные параметры структуры конечных изделий (вид структуры, величина угла сдвига витков, степень замыкания намотки, линейная плотность нитей и т.д.), а так же, их габаритные размеры и масса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Д. М. Боги и люди Древнего Египта / Пер. с английского Калашниковой Л.А. – М., ЗАО Центрполиграф. 2007., 189с.
2. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М. Машиностроение . 1977, 144.с.
3. Александров С.А., Кленов В.Б.,Формирование ткацких паковок М.Легкая индустрия, 1976.118 с.
4. Сухарев В.А., Матюшев И.И. Расчет тел намотки. М. Машиностроение. 1982, 136 с.
5. Андросов В.Ф., Александров С.А., Артым М.И., Кленов В.В., Якимчук Р.П. Крашение пряжи в паковках. М. Легкая индустрия 1974. 152 с.
6. Morden J.F.C. Metalllik Fibers «Metal Industry» 1960.
7. Конкин А.А., Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. М. 1974.
8. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. Санкт-Петербург, Научные основы и технологии, 2009. — 380.
9. Гришина О.И., Кочетов В.Н., Шавнев А.А., Серпова В.М. Аспекты Результаты работы внедрены в производство предприятий ВПК, и при создании систем экологической безопасности человека, а именно на предприятиях применения высокопрочных и высокомодульных волокнистых металлических композиционных материалов авиационного назначения (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №10. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.04.2017).
10. Nochovnaya N., Izotova A., Alexeev E., Ivanov V. Opportunities of increase of mechanical properties of the deformed semi finished products from Ti-Al-Nb system

alloys // Ti 2011 - Proceeding of the 12th World Conference on Titanium. 2012. P. 1383-1386.

11. National Research Council Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites: Advanced Materials for the Twenty-First Century. Washington D.C.: Nat. Academy Press, 1998. P. 37-38.

12. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., Горбаткина Ю.А., Кржижановский В.К., Куперман А.М., Симонов-Емельянов И.Д., Хабибулин В.И., Бунаков В.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. Учебное пособие / Изд. «Профессия». 2008. – 560с.

13. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы – М., Стройиздат, 1986.

14. Русаков А.В. Базальтовые волокна и композиционные материалы на их основе. Материалы конференции Узб. – ВОИС, семинар НАТО.

15. Андреев А.А. Возможности практического применения нетканых полотен Viledon для изготовления композиционных материалов. // Нетканые материалы, № 3, 2008.

16. Сергеевков А.П., Ватцп А. Перспективные методы производства волокон для нетканых материалов. // Полимерные материалы - №2, 2006 с. 31 – 35.

17. Матвеева Т.А. Производство нетканых материалов в России в период 2001 – 2003гг. // Текстильная промышленность №3(5). 2003.

18. Трещалин Ю.М. Развитие методологии проектирования новых структур и исследование свойств полимерных композиционных материалов на основе нетканых полотен. Дисс. ...докт. техн. наук, ФГБОУ ВП РФ ИГПУ. Иваново 2021.

19. Николаев С.Д., Панин И.Н., Панин М.И., Кашеев О.В., Николаева Н.А. Пути совершенствования структуры иглопробивных прессовых сукон. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 281-284.

20. Николаев С.Д., Панин И.Н., Панин М.И., Рыбаулина И.В. Использование различных текстильных фильтров, применяемых при очистке воздуха и газов от пыли. Дизайн и технологии. 2018. № 66 (108). С.84-88.
21. Бершев Е.Н., Курицин В.В., Куриленко А.И., Смирнов Г.П. Технология производства нетканых материалов. М. Легкая и пищевая промышленность, 1982, 352с.
22. Белицин М.Н. О структуре и механических свойствах полиамидных комплексных нитей. – В книге Научно – исследовательские труды ВНИИПХВ, 1966. Ч.1. М «Легкая индустрия» 1969. С 26 – 38.
23. Белицин М.Н. Оптимизация механических свойств синтетических филаментных нитей - //, Химические волокна №3. 1970. С. 38 – 40.
24. Батаева А.А. Композитные материалы: строение, получение, применение. Учебник. Изд. НГТУ г. Новосибирск, 2002. 384с.
25. Белицин М.Н. Синтетические нити. М. «Легкая индустрия» 1970. 192с.
26. Белицин М.Н. Физическая модификация химических нитей. – Препринты международного симпозиума по химическим волокнам в Калинике, НИИТЭХИМ. 1974. С 74 – 77.
27. Белицин М.Н., Садкова Н.А. , Селезнева Н.И. и др. Шелкоподобная полиамидная нить. 11 Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Нефтехимия «Наука», м. 1974. 231 – 232с.
28. Белицин М.Н., Никитина К.П., Садкова Н.А. и др. Модифицированная полиамидная нить шелон, подобная натуральному шелку. – «Химические волокна №5», 1975., 43 – 44с.
29. Смирнов Л.С., Шавлюк В.Н. Текстурированные нити. М. «Легкая индустрия» 1979., 230с.
30. Подкуйко И.Н. Получение текстурированных нитей в процессе формирования и вытягивания. М. НИИТЭХИМ. Сб. научных трудов., 1974.
31. Welge W.E. – Chemiefasern. 1970. №2. S 113.

32. Karlheinz Gitel, Heino Martin. Deutsche Akademie. Institute fur Technologie der Fasern.

33. Wierdner H.P. Speziell Melliand Textilber., 1968, 49 S.

34. Панин М.И., Омегова Т.А. Разработка и исследование методов снижения обрывности нитей основы, при выработке технических сукон. Тезисы доклада НТ Конференции МГТУ им. А.Н. Косыгина М. 2007.

35. Панин М.И., Капустин В.М., Цимбалюк А.Е., Хакимов Р.В. Об использовании комплексных нитей для армирования волокнистых композиционных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6 (396). С. 103-106.

36. Саввиатов П. Описание старинных русских утварей, одежд, оружия, ратных доспехов и конского прибора в азбучном порядке расположенное. С – Питербург, Академия наук 1896.

37. Летопись по Иппатову списку, 1871, 401с.

38. Металлизация текстильных изделий и металлическая пряжа. Серия «Зарубежная техническая информация». Выпуск 13. Изд. Бюро технической информации легкой промышленности 1958.

39. Simon/Huebner Vorbereitungstechnik fuer die Weberei, Wirkerei und Strikerei/ VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1983 391 s.

40. А. В. Труевцев, Е. С. Цобкалло, О. А. Москалюк, К. А. Молоснов. – Полимерные композиты с кулирным трикотажным наполнителем: монография /СПб.: ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2020. – 169 с.

41. Труевцев, А. В. Влияние вида нитей на механические свойства композитов, армированных трикотажем/ А.В. Труевцев, К.А. Молоснов, А.В. Беляева, Д.М. Дарвиш// Известия вузов. Технология легкой промышленности, 2011. - № 1. – С. 45-47.

42. Труевцев, А. В. Квазинепрерывное армирование композита кулирным трикотажем / А. В. Труевцев, Е. С. Цобкалло, О. А. Москалюк // Изв. вузов. Технология легкой промышленности, 2016. - № 1. – С. 64-67.

43. Труевцев, А. В. Структура и свойства композиционных материалов с кулирным трикотажным наполнителем / А. В. Труевцев, Е. С. Цобкалло, О. А. Москалюк // Химические волокна, 2018. - № 4. – С. 71-76.

44. Postle, R. Analysis of the dry-relaxed knitted loop configuration / R. Postle, D. L. Munden // Journal of the Textile Institute. – 1967. – Vol. 58. – № 8. – P. 329 – 365.

45. Особенности структуры поллой ткани. Панин И.Н., Николаев С.Д., Панин М.И., Рыбаулина И.В. Дизайн и технологии. 2018. № 65 (107). С. 95-98.

46. Филиппова Т.Ф. Разработка структуры и технологии выработки высокообъемных технических тканей: Дисс. ... канд. техн. наук.,-ЛИТиЛП им. С.М.Кирова, Ленинград, 1982. – 188 с.

47. Каревой Т.Ю. Разработка способа, технологии изготовления тканей новых структур. Дисс. ...докт. тех. наук-МГТУ им. А.Н.Косыгина,2005.

48. Карева Т.Ю., Николаев С.Д. Разработка способа получения тканей новых структур и механизмов для его реализации на ткацких станках с кулачковым зевобразовательным механизмом. М. Научное издание, МГТУ им. А.Н. Косыгина 2003.

49. Синицын А.И. Разработка оптимальных технологических параметров изготовления тканей на основе вторичной арамидной пряжи. Дисс. канд. техн. Наук - МГТУ им А.Н. Косыгина, 2008.

50. Киселев А.М. Разработка методологии проектирования геометрических структур и прогнозирования свойств текстильных материалов объемного строения. Дисс. докт. техн. наук. - КГТУ, Казань. 2019.

51. Киселев А.М. Методика 3D моделирования трехмерных ортогональных тканей. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности № 1. 2023.

52. Интернет ресурс: «Plastinfo.ru» Полимерные композиты на основе химических волокон: основные виды, свойства, применение Пт, 21 Декабрь 2007 | Тема: Сырье.

53. Черняева О.Е. Совершенствование технологии изготовления технических тканей специального назначения из арамидных нитей на ткацких станках фирмы DORNIER. Дисс. ... канд.техн. наук. МГТУ имени А.Н. Косыгина, м. 2010.

54. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты Изд. Научные основы и технологии. М. 2009. 400с.

55. Гречухин А.П., Хабибулаев А., Рудовский П.Н., Старинец И.В., Куликов А.В. Методика 3D моделирования трехмерных ортогональных тканей. // Вестник КГТУ 2022.

56. Базаева Е.М., Еремкин Д.И., Литвинов В.Б., Токсанбаев М.С. Разработка преформы цельнотканного трехмерного каркаса вентиляторной лопасти. - // Авиационная промышленность. №1, 2008., с 42 – 44.

57. Донецкий К.И, Хрульков А.В., Коган Д.Ю., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объёмно-армированных преформ при производстве изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2013.№1. с.35-39.

58. Николаев С.Д., Панин М.И., Исследование прочностных характеристик мотальных паковок специального назначения с помощью развёрток // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности №8 (329) 2010 г. 40 с.

59. Колесников С.А. Технологическое обеспечение изготовления крупногабаритных конструкций из углерод-углеродных композиционных материалов. // Конструкции из композиционных материалов № 4, 2017. С 18 – 27.

60. Панин М.И. Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения. Дисс. канд. техн. наук МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2012, 158с.

61. Колесников В. А. Анализ и разработка механизмов для формирования намоточных изделий заданной структуры. Дисс. канд. техн. наук, С-ПГУПТ г. Санкт-Петербург. 2022.

62. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.

63. Панин И.Н. Разработка и исследование структур мотальных паковок сомкнутой намотки. Дисс. канд. техн. наук, ЛИТЛП им. С.М. Кирова Ленинград 1983.

64. Гордеев В.А., Арефьев Г.И., Волков П.В. Ткачество. Учебник. М. «Легкая Индустрия». М.1984.

65. Панин М.И., Гареев А.Р., Карпов А.П., Корчинский Н.А., Калугина К.Е. О структурах намотки мотальных паковок, их названиях и областях применения при армировании композиционных материалов. Технологии и качество. 2022. № 3 (57). С. 24-29.

66. Зайцев В.П. Зависимость длины нити, наматываемой на цилиндрическую бобину от угла поворота бобины. // Текстильная промышленность. №4. 1988.

67. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления Учебник для ВУЗов 4Т Изд. М. «Интеграл-Пресс» 2002.

68. Батаева А.А. Композитные материалы: строение, получение, применение. Учебник. Изд. НГТУ г. Новосибирск, 2002. – 384 с.

69. Рокотов Н.В. Теоретические основы разработки намоточных механизмов для получения изделий с заданными свойствами и структурами. Дисс. д.т.н., Санкт-Петербург 2018.

70. Kashcheev O.V., Nikolaeva N.A., Panin M.I., Knyaz'kin S.V., Krotov S.Y. Calculation of the loads on composite materials formed by winding. Fibre Chemistry. 2014. Т. 46. № 2. С. 122-125.

71. Панин М.И., Гареев А.Р., Корчинский Н.А., Радайкин Д.А., Слюсарев А.А. Разработка технологии армирования углерод-углеродных композиционных материалов методом разверток намоток мотальных паковок заданной структуры. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 2 (404). С. 235-242.

72. Смолянский М.А. Таблицы неопределенных интегралов. М., «Наука» 1965.
73. Прошков А.Ф. Механизмы раскладки нити, М. Легпромбытиздат, 1986.- с.7.
74. Ефремов Е.Д, Ефремов Б.Д. Основы теории наматывания нити на паковку М. Легкая индустрия 1982, 144 с.
75. Коломиец А.Я. Исследование структуры намотки трубчатых текстильных фильтров: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (05.19.03) / Ленингр. ин-т текстильн. и лег. пром-сти им. С. М. Кирова. - Ленинград : [б. и.], 1976. - 25 с.
76. Моисеев Г.К. «Влияние конструктивных и кинематических параметров наматывающих механизмов на характер расположения нитей на паковках» // Химические волокна. №2, 1973.
77. Рудовский П.Н. Теоретические основы формирования технологической оценки паковок при фрикционном наматывании. Дисс ... д.т.н. Кострома, 1996.
78. Рудовский П.Н. Влияние взаимодействия витков на процесс раскладки // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. №5 1995.
79. Светик Ф.Ф. Проектирование механизмов раскладки нити М. Машиностроение, 1984, 216 с.
80. Александров М.П., Колобов Н.А. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование»/— М.: Машиностроение, 1986 — 40.
81. Высоцкая Н.Н., Иерусалимский А.М. Невельсон Р.А. Федоренко В.А. Технические развёртки изделий из листового материала. Изд. Машиностроение 1968.272 с.
82. Панин М.И. Исследование прочностных характеристик мотальных паковок специального назначения с помощью разверток / С.Д. Николаев, И.Н. Панин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2010. - N 8 (329). – С. 40 – 44.

83. Аюшев Т.В. Геометрические вопросы адаптивной технологии изготовления конструкций намоткой из волокнистых композиционных материалов. Изд. БНЦСО РАН г. Улан – Уде, 2005.

84. Чесноков А.В. Перспективы улучшения качества углерод-углеродных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технологии –Х (Украина): НАКУ «КХАІ» -Вып.6 (53). – с 51-54.

85. Колесников С.А., Бамборин М.Ю. Способ получения углеродного материала многонаправленного армирующего каркаса из углеродного волокна. Патент РФ № 2534878. [Электронный ресурс], URL : <http://www.freepatent.ru/2534878>. 2017.

86. Кардашов Д.А. Кудишина В.А., Шумская Н.И. Эпоксидные смолы и техника безопасности при работе с ними. М. «Машиностроение» 1964. с.135.

87. Kraus I.G., J.Phys Chem., 59, 343 (1955). A.C.S. 148th National Meeting Organic and Plastic Chemistry Div., Preprint (1964), p.318.

88. Белый В.А., Купчинов Б.И., Михневич А.С. К вопросу о механизме трения наполненных полимеров.- сб. О природе трения твёрдых тел. Минск. «Наука и техника», 1971.

89. Рогозина З.А., Сборник переводов и обзоров. Армирование полимерных материалов. Изд. «Мир», Москва 1968., с. 243.

90. Александров М.П., Погосян А.К., Стакян М.Г. Исследование параметров повторно-кратковременного трения в вероятностном аспекте.- Вестник машиностроения, 1972, №5.

91. Буковский П.О. Теоретико-экспериментальное изучение фрикционных характеристик углерод-углеродных композиционных материалов. Дисс. канд. техн. наук ИПМех РАН, 2023, 134с.

92. Белый А.В., Свиридёнок А.И., Дубровский В.С. О регулировании фрикционных свойств композиционных материалов. – ДАН СССР, 1974, т.217, №3.

93. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов. М. «Наука», 1977.

94. Панин М.И., Гареев А.Р., Слюсарев А.А., Кулаков О.И., Соболева Т.А. Исследование структур каркасных тканей и иглопробивных полотен, выполненных в виде заготовок для производства углерод-углеродных тормозных дисков. Технологии и качество. 2024. № 4 (66). С. 14-20.

95. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов. Издательство «Наука», 1977.

96. Николаев С.Д., Панин И.Н., Панин А.И., Панин М.И., Кащеев О.В., Рыбаулина И.В. Пути совершенствования пористых перегородок воздушных фильтров из текстильных материалов. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 5 (377). С. 255-258.

97. Кирш А.А. Моделирование и расчёт аэрозольных волокнистых фильтров. Дисс. Док. наук М. ГНЦНИФХИ им. Л.Я. Карпова, 1977. 241 с.

98. Николаев С.Д., Зайцев В.П. О тонкости очистки фильтрата и производительности трубчатых текстильных фильтров // Известия вузов. Технология текстильной промышленности №. 2005.

99. Колесников С.А. Технологическое обеспечение изготовления крупногабаритных конструкций из углерод-углеродных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов №4 2017 18с.

100. Панин М.И., Гареев А.Р., Корчинский Н.А, Слюсарев А.А., Загвоздина Л.И, Влияние структуры армирования, изготовленной методом намотки, на фрикционные свойства углерод - углеродных композиционных материалов. Сборник статей «Научные технологии» АО «НИИГрафит» - 2023 г.

101. Колесников С.А., Кравецкий Г.А., Бухаров С.В., Костиков В.И. Крупногабаритные сопла для ракетных двигателей из углерод-углеродных композиционных материалов // Технология машиностроения. 2006. №8. с.11-17.

102. Панин М.И., Гареев А.Р., Карпов А.П., Максимова Д.С., Корчинский Н.А. Анализ текстильных структур армирующих компонентов композиционных материалов и выбор областей их применения. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия

Машиностроение. 2023. № 2 (145). С. 15-28.

103. Панин И.Н., Панин М.И., Николаев С.Д., Николаев А.С., Гаврилова И.М. Расчет коэффициента заполнения структур композитных материалов текстильным армирующим компонентом. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2013. № 1 (343). С. 73-78.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### **Методика определения предела прочности и модуля упругости образцов композиционных материалов, с текстильной армирующей составляющей при растяжении.**

(Методика отработана на базе ASTM D3039).

Настоящая методика выполнения измерений (МВИ) устанавливает порядок выполнения измерений предела прочности и модуля упругости при разрушении при растяжении образцов композиционных материалов при постоянной скорости деформирования.

МВИ распространяется на полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные непрерывными высокомодульными углеродными и стеклянными волокнами, структура которых симметрична относительно их срединной плоскости, и препреги, полученные различными способами с применением полимеров-связующих.

#### 1. Требования к погрешности измерений.

Погрешность измерений универсальной разрывной машины H100KS («Hounsfield», Англия):

- погрешность измерения силы  $\pm 0,5\%$  при нагрузке от 2 до 100% от максимальной нагрузки силоизмерительного датчика,  $\pm 1\%$  при нагрузке от 1 до 2% максимальной нагрузки силоизмерительного датчика;
- погрешность измерения перемещения траверсы:  $\pm 0,01$  мм;
- погрешность скорости перемещения траверсы  $\pm 0,05\%$  от установленной.

Экстензометр Epsilon Technology Corporation (Jackson, WY U.S.A.) модель 3560-BIA-050M-005-HT2; точность измерений – Class A по ASTM E83.

Расхождение между результатами двух измерений, полученными на идентичном испытуемом материале одним оператором с использованием одного и того же оборудования и в пределах кратчайшего из возможных интервалов времени, должно превышать предел повторяемости ( $r$ ) в среднем не чаще одного раза на 20 случаев.

Результаты измерений на идентичном испытуемом материале, полученные двумя лабораториями, должны различаться с превышением предела воспроизводимости (R) в среднем не чаще одного раза на 20 случаев.

## 2. Средства измерений, вспомогательные устройства.

При выполнении измерений применяют следующие средства измерений и другие технические средства:

- универсальная разрывная машина H100KS («Hounsfield», Англия);
- захваты должны обеспечивать надежное крепление и точное центрирование образца (продольная ось образца должна совпадать с направлением действия растягивающей нагрузки). Для надежного крепления образца при испытании высокомодульных, высокопрочных композиционных материалов применяют захваты с насечкой на рабочих поверхностях под углом  $\pm 45^\circ$  с шагом 1–2 мм на длине не менее 70 мм;
- специальный (контрольный) образец для тестирования правильности установки захватов. Для проверки соосности приложения нагрузки необходимо установить и испытать один специальный образец (из приготовленных к испытаниям) с тремя наклеенными тензорезисторами;
- экстензометр Epsilon Technology Corporation (Jackson, WY U.S.A.); модель 3560-BIA-050M-005-HT2; рабочая длина 50 мм; перемещение  $\pm 2,5$  мм в аксиальном направлении (вдоль оси);
- приборы для измерения геометрических размеров образца: штангенциркуль с погрешностью  $\pm 0,01$  мм, микрометр с погрешностью  $\pm 0,001$  мм.

## 3. Метод измерений.

Метод состоит в кратковременном испытании образцов из ПКМ на растяжение с постоянной скоростью деформирования, при котором определяют:

- предел прочности при растяжении ( $\sigma_b$ ), отношение максимальной нагрузки  $F_{\max}$  предшествующей разрушению образца, к начальной площади его поперечного сечения, МПа или ГПа;

– модуль упругости (E), отношение напряжения к соответствующей относительной деформации при нагружении материала в пределах начального линейного участка диаграммы деформирования, МПа или ГПа.

#### 4. Требования безопасности.

4.1. Соблюдать требования безопасности, изложенные в паспорте на эксплуатируемое оборудование и оснастку.

4.2. При испытании материала необходимо установить предохраняющие экраны из прозрачного материала.

#### 5 Требования к квалификации операторов

К выполнению измерений и (или) обработке их результатов допускают лиц со специальным химическим или физическим образованием (не ниже бакалавра), знакомых с основными принципами работы и оборудованием и допущенных к самостоятельной работе.

#### 6 Условия выполнения измерений

Испытания при нормальных условиях следует проводить в помещении при температуре и относительной влажности окружающего воздуха или другой среды, указанных в технических условиях на испытываемый материал. Если таких указаний нет, то испытания необходимо проводить при одной из стандартных атмосфер по ГОСТ 12423-66 (Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб))

#### 7 Подготовка к выполнению измерений

##### 7.1. Подготовка к выполнению измерений.

7.1.1. Кондиционирование образцов проводят в соответствии с техническими условиями или стандартами на материал. Если в этой документации не указаны условия кондиционирования, то перед испытанием образцы кондиционируют при одной из стандартных атмосфер по ГОСТ 12423–66.

7.1.2. Время от окончания изготовления композиционного материала до испытания должно составлять не менее 16 ч, включая кондиционирование.

7.1.3. Проводят процедуру юстировки зажимов и определения оптимального расположения образцов в зажиме. Для этого к пластине с такими же параметрами как и у образцов испытываемого материала прикрепляли 3 тензорезистора (ТР1, ТР2 и ТР3) в соответствии с рисунком П1-1:

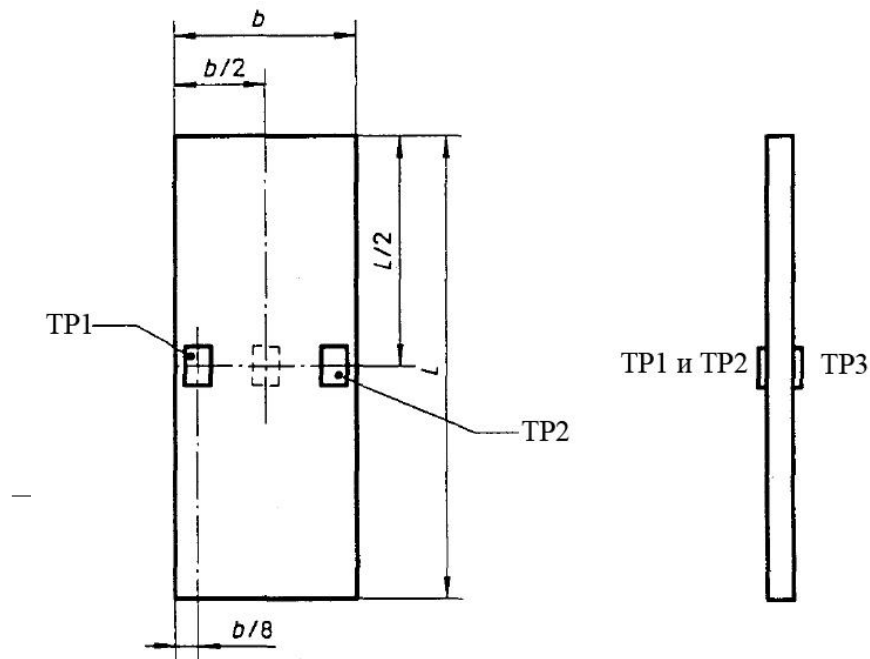


Рисунок П1-1 – Пример наклеивания тензорезисторов на образец

– ТР1 и ТР2 – параллельно оси образца с одной его стороны, причем расстояние до края образца каждого из терморезисторов составляло 1,5 мм ( $1/8$  от общей ширины образца).

– ТР3 – параллельно оси образца, с противоположной стороны на середине ширины образца, точно напротив ТР1 и ТР2.

Рекомендуется для процедуры выравнивания использовать пластины из материала, из которого изготовлены сами образцы.

Возникающее искажающее напряжение в образце в направлении его ширины ( $B_b$ ) и толщины ( $B_h$ ) рассчитывают следующим образом:

$$B_b = \frac{4|e_2 - e_1|}{3e_{av}} \cdot 100, \quad (\text{П1-1})$$

$$B_h = \frac{|e_{av} - e_3|}{e_{av}} \cdot 100, \quad (\text{П1-2})$$

где  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  – напряжение, фиксируемое тензорезисторами ТР1, ТР2, ТР3 соответственно, а  $e_{av}$  вычисляется по формуле:

$$e_{av} = \left( \frac{|e_1|}{4} + \frac{|e_2|}{4} + \frac{|e_3|}{2} \right). \quad (\text{П1-3})$$

Считается, что зажимы юстированы достаточно, порядок монтирования образцов и их расположение в зажимах удовлетворительным, если выполнялось следующее неравенство:

$$B_b + B_h \leq 3,0\%. \quad (\text{П1-4})$$

7.2. Для испытаний однонаправленных композиционных материалов применяют образцы в виде полосы прямоугольного сечения с закрепленными на концах накладками (рисунок П1-2). Размеры и необходимые условия приготовления образцов приведены в таблице П1-1. При определении модулей упругости и коэффициента Пуассона этих материалов могут также использоваться образцы-полоски без накладок.

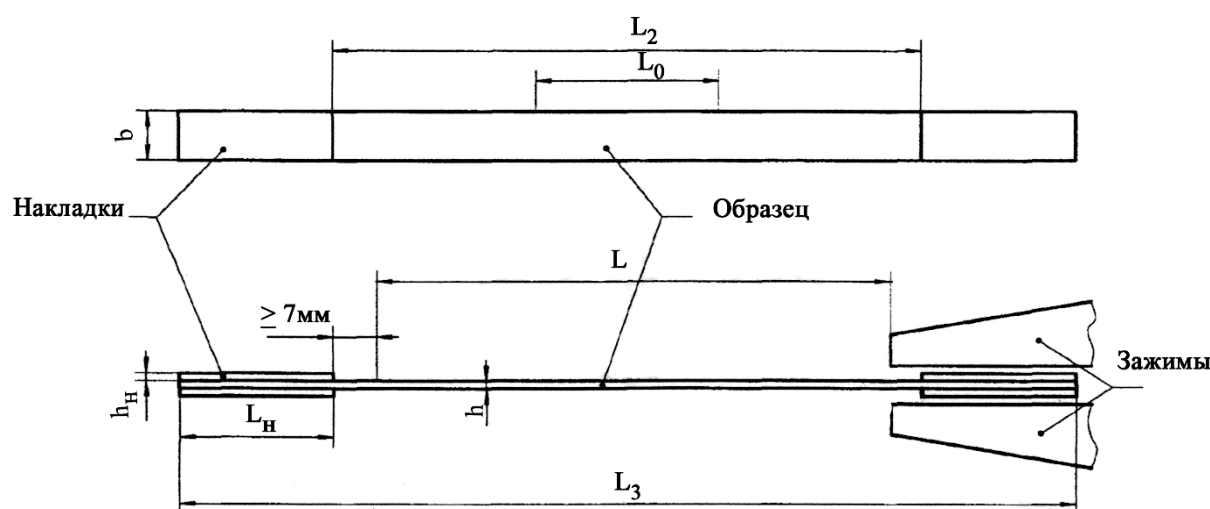


Рисунок П1-2 – Вид образца в виде полосы прямоугольного сечения с закрепленными на концах накладками

Таблица 1 – Размеры и необходимые условия приготовления образцов

| Наименование              |       | Значение, мм |
|---------------------------|-------|--------------|
| Общая длина               | $L_3$ | 250          |
| Расстояние между зажимами | $L$   | 130          |

|                             |       |                |
|-----------------------------|-------|----------------|
| Расстояние между накладками | $L_2$ | 140            |
| Рабочее расстояние          | $L_0$ | $\geq 50$      |
| Ширина                      | $b_1$ | $15,0 \pm 0,5$ |
| Толщина                     | $h$   | $1,0 \pm 0,2$  |
| Толщина накладок            | $h_T$ | 1,5            |
| Длина накладок              | $L_n$ | $\geq 55$      |

7.3. Для испытаний ПКМ с неонаправленной арматурой следует применять образцы в виде полосы прямоугольного сечения с закрепленными на концах накладками (рисунок П1-2). Размеры и необходимые условия приготовления образцов приведены в таблице П1-2. При определении модулей упругости и коэффициента Пуассона этих материалов могут также использоваться образцы-полоски без накладок.

Таблица П1-2 – Размеры и необходимые условия приготовления образцов

| Наименование                |       | Значение, мм   |
|-----------------------------|-------|----------------|
| Общая длина                 | $L_3$ | 250            |
| Расстояние между зажимами   | $L$   | 130            |
| Расстояние между накладками | $L_2$ | 140            |
| Рабочее расстояние          | $L_0$ | $\geq 50$      |
| Ширина,                     | $b_1$ | $25,0 \pm 0,5$ |
| Толщина                     | $h$   | 2-10           |
| Толщина накладок            | $h_T$ | 1,5            |
| Длина накладок              | $L_n$ | $\geq 55$      |

7.4. Отклонение образцов от номинальных размеров по ширине и толщине рабочей зоны не должно превышать 0,05 мм.

7.5. Расположение арматуры должно быть симметрично относительно срединной плоскости образца, проходящей через его ось и параллельной плоскости укладки арматуры.

7.6. Условия изготовления образцов, механическая обработка, место и направление их вырезки из плит предусматриваются в нормативно-технической документации на ПКМ.

7.7. Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, неровностей, надрезов, царапин, трещин или других видимых невооруженным глазом дефектов.

7.8. Накладки для образцов следует изготавливать из стеклотекстолита марки КАСТ-В толщиной 1,5 мм, согласно ГОСТ 10292-74. Направление укладки волокон накладок должно составлять угол  $45^\circ$  с направлением укладки волокна образца.

7.9. Для приклеивания накладок используют клей Permabond 920 (технология приклейки накладок указана в нормативно-технической документации на клей).

7.10. Количество образцов, необходимое для определения одной из характеристик п. 3 в заданном направлении композиционного материала одной партии, должно быть не менее пяти. Если разрушение образца при испытании происходит не от нормальных напряжений или вне рабочей зоны, то данные в расчет не принимаются и образец заменяется.

## 8. Выполнение измерений

8.1. Перед испытанием измеряют толщину и ширину рабочей части образца в трех местах: по краям и в середине. Среднее значение толщины и ширины образца записывают в протокол испытаний и по ним, с точностью до двух значащих цифр, определяют площадь поперечного сечения образца.

8.2. Установить образец в захватах испытательной машины так, чтобы их продольные оси совпали с прямой, соединяющей точки крепления захватов в испытательной машине.

8.2. Для измерений деформации установить экстензометр.

8.3. Задать скорость перемещения активного захвата машины 2 мм/мин.

8.4. Равномерно повышать нагрузку на образец с заданной скоростью вплоть до его разрушения.

8.5. В процессе испытания записывают изменение продольной деформации образца  $\Delta l$  в зависимости от нагрузки.

## 9. Обработка результатов измерений

9.1. Предел прочности при растяжении,  $\sigma_b$ , МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_b = \frac{F_{\max}}{b \cdot h},$$

где  $F_{\max}$ , Н, – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца;  
 $b$  и  $h$ , мм, – ширина и толщина образца соответственно.

9.2. Модуль упругости при растяжении ( $E$ ), МПа, определяют по формуле

$$E = \left( \frac{F_2 - F_1}{bh} \right) \left( \frac{l_2 - l_1}{l_0} \right),$$

где  $F_1$  – нагрузка в Н на образец при относительном удлинении  $\varepsilon=0,1\%$ ;

$F_2$  – нагрузка в Н на образец при относительном удлинении  $\varepsilon=0,3\%$ ;

$l_1$  – удлинение образца в мм при  $\varepsilon=0,1\%$ ;

$l_2$  – удлинение образца в мм при  $\varepsilon=0,3\%$ ;

$l_0$  – рабочая зона экстензометра или другого измерителя деформации, мм.

## 10. Контроль погрешности результатов измерений

Статистическую обработку результатов испытания проводят по ГОСТ Р ИСО 5725-2002 при доверительной вероятности 0,95.

## 11. Оформление протокола испытания

Результаты измерений оформляют протоколом, который должен содержать:

### 1. Сведения об аппаратуре:

- а) наименование испытательной машины;
- б) наименование экстензометра;
- в) наименование регистрирующей аппаратуры.

### 2. Сведения об образцах:

- а) наименование и марку материала;
- б) количество образцов;
- в) содержание армирующего наполнителя по объёму (весу), %;

г) расположение армирующего наполнителя в образцах;

д) условия кондиционирования.

3. Сведения об условиях испытаний (если необходимо):

а) температура;

б) относительная влажность;

в) режим нагружения (непрерывное, ступенчатое);

г) скорость нагружения.

4. Результаты испытаний:

а) величины характеристик;

б) результаты статистической обработки данных.

12. Нормативные ссылки

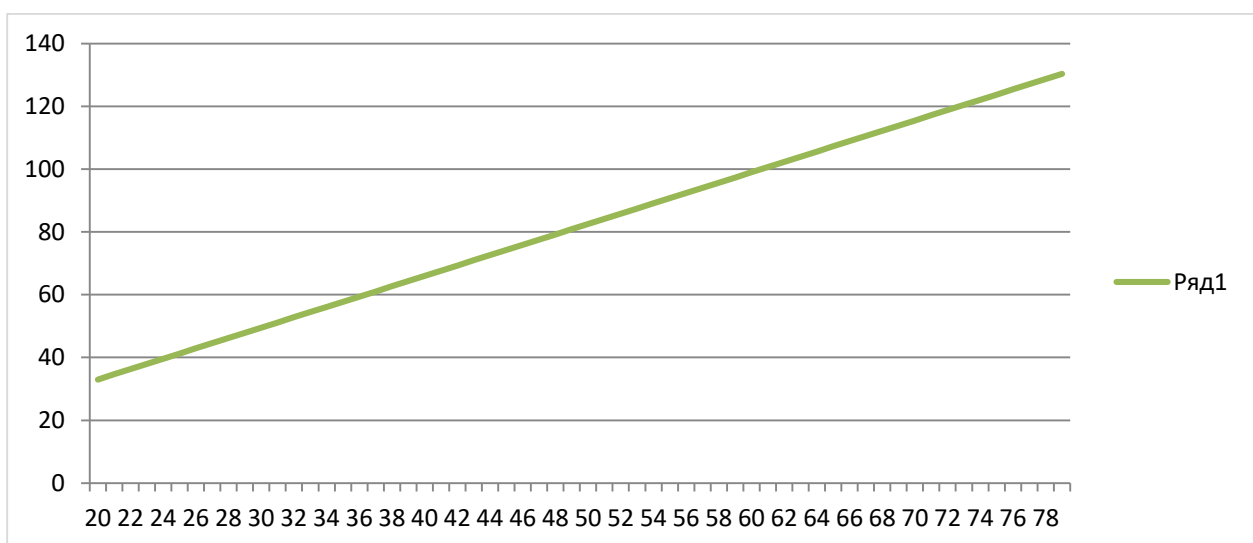
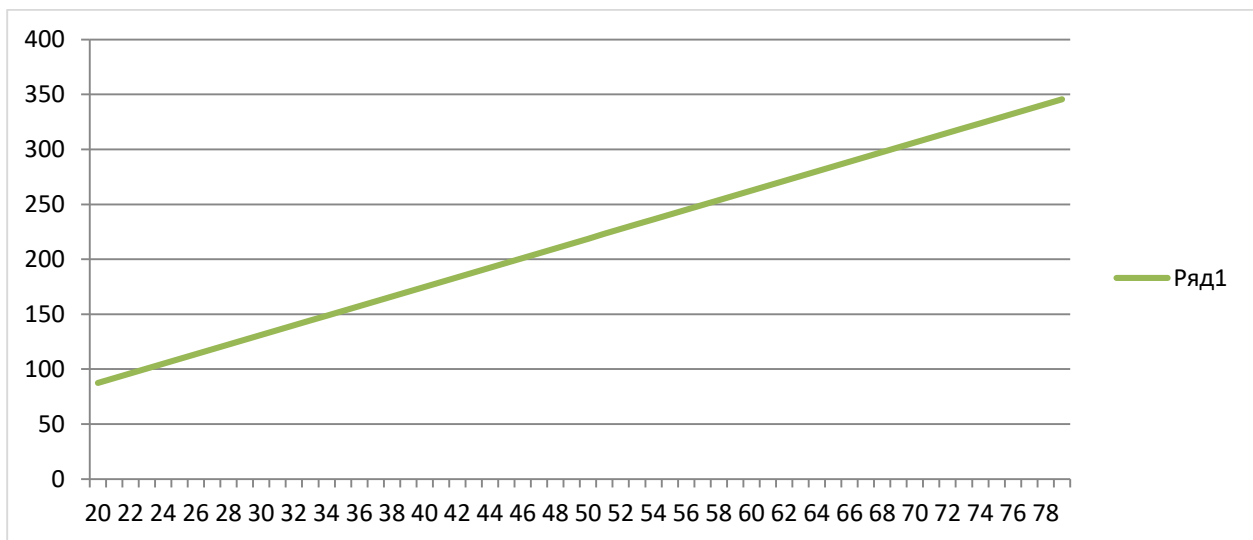
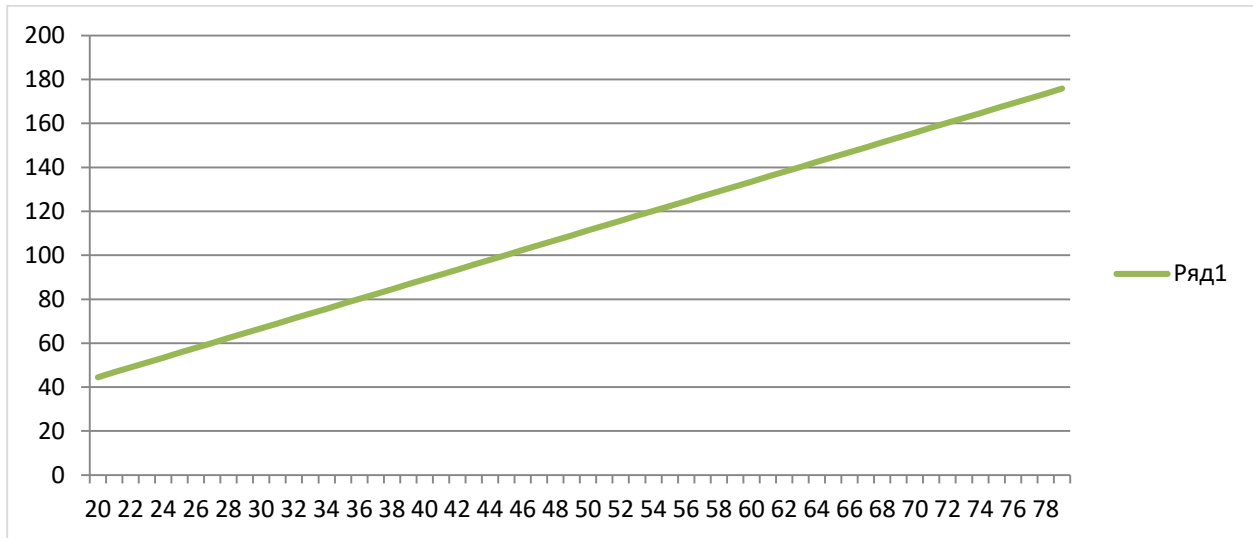
Для составления настоящей МВИ использованы ссылки на следующие стандарты: ASTM D3039, ASTM E83, ГОСТ 12423-66, ГОСТ 10292-74, ГОСТ Р ИСО 5725-2002.

Прочностные характеристики намотки углеродных нитей 24К на цилиндрическую оправку

| m  | R <sub>x</sub> | R <sub>y</sub> | R <sub>c</sub> |
|----|----------------|----------------|----------------|
| 20 | 44,5125        | 87,4875        | 33             |
| 21 | 46,73813       | 91,86187       | 34,65          |
| 22 | 48,96375       | 96,23625       | 36,3           |
| 23 | 51,18938       | 100,6106       | 37,95          |
| 24 | 53,415         | 104,985        | 39,6           |
| 25 | 55,64063       | 109,3594       | 41,25          |
| 26 | 57,86625       | 113,7337       | 42,9           |
| 27 | 60,09188       | 118,1081       | 44,55          |
| 28 | 62,3175        | 122,4825       | 46,2           |
| 29 | 64,54313       | 126,8569       | 47,85          |
| 30 | 66,76875       | 131,2312       | 49,5           |

|    |          |          |       |
|----|----------|----------|-------|
| 31 | 68,99438 | 135,6056 | 51,15 |
| 32 | 71,22    | 139,98   | 52,8  |
| 33 | 73,44563 | 144,3544 | 54,45 |
| 34 | 75,67125 | 148,7287 | 56,1  |
| 35 | 77,89688 | 153,1031 | 57,75 |
| 36 | 80,1225  | 157,4775 | 59,4  |
| 37 | 82,34813 | 161,8519 | 61,05 |
| 38 | 84,57375 | 166,2262 | 62,7  |
| 39 | 86,79938 | 170,6006 | 64,35 |
| 40 | 89,025   | 174,975  | 66    |
| 41 | 91,25063 | 179,3494 | 67,65 |
| 42 | 93,47625 | 183,7237 | 69,3  |
| 43 | 95,70188 | 188,0981 | 70,95 |
| 44 | 97,9275  | 192,4725 | 72,6  |
| 45 | 100,1531 | 196,8469 | 74,25 |
| 46 | 102,3788 | 201,2212 | 75,9  |
| 47 | 104,6044 | 205,5956 | 77,55 |
| 48 | 106,83   | 209,97   | 79,2  |
| 49 | 109,0556 | 214,3444 | 80,85 |
| 50 | 111,2813 | 218,7187 | 82,5  |
| 51 | 113,5069 | 223,0931 | 84,15 |
| 52 | 115,7325 | 227,4675 | 85,8  |
| 53 | 117,9581 | 231,8419 | 87,45 |
| 54 | 120,1838 | 236,2162 | 89,1  |
| 55 | 122,4094 | 240,5906 | 90,75 |
| 56 | 124,635  | 244,965  | 92,4  |
| 57 | 126,8606 | 249,3394 | 94,05 |
| 58 | 129,0863 | 253,7137 | 95,7  |

|    |          |          |        |
|----|----------|----------|--------|
| 59 | 131,3119 | 258,0881 | 97,35  |
| 60 | 133,5375 | 262,4625 | 99     |
| 61 | 135,7631 | 266,8369 | 100,65 |
| 62 | 137,9888 | 271,2112 | 102,3  |
| 63 | 140,2144 | 275,5856 | 103,95 |
| 64 | 142,44   | 279,96   | 105,6  |
| 65 | 144,6656 | 284,3344 | 107,25 |
| 66 | 146,8913 | 288,7087 | 108,9  |
| 67 | 149,1169 | 293,0831 | 110,55 |
| 68 | 151,3425 | 297,4575 | 112,2  |
| 69 | 153,5681 | 301,8319 | 113,85 |
| 70 | 155,7938 | 306,2062 | 115,5  |
| 71 | 158,0194 | 310,5806 | 117,15 |
| 72 | 160,245  | 314,955  | 118,8  |
| 73 | 162,4706 | 319,3294 | 120,45 |
| 74 | 164,6963 | 323,7037 | 122,1  |
| 75 | 166,9219 | 328,0781 | 123,75 |
| 76 | 169,1475 | 332,4525 | 125,4  |
| 77 | 171,3731 | 336,8269 | 127,05 |
| 78 | 173,5988 | 341,2012 | 128,7  |
| 79 | 175,8244 | 345,5756 | 130,35 |



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Фотографии изготовленных композиционных фильтров трех типов

Фотографии изготовленных корпусов фильтров трех типов.



Рисунок А1 - Корпуса фильтра насадочного типа большого типоразмера



Рисунок А 2 - Корпус фильтра коллекторного типа в разборе



Корпуса фильтров трех типов



Фильтровальные элементы двух типов

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3****Технологическая карта изготовления воздухоочистительных фильтров**

|                                                                                                                         |                |                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      |                | УТВЕРЖДАЮ<br>Заместитель директора<br>по научной работе<br>Е.П. Цимбалюк<br>ООО «ООО НИЭК» |
| <b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА</b><br><b>ПРОИЗВОДСТВО КОМПОЗИЦИОННЫХ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ «НИЭК»</b><br><b>№ 001</b> |                |                                                                                            |
| Дата введения с 01.12.2022                                                                                              |                |                                                                                            |
| Главный технолог<br>                 | Московкин А.А. |                                                                                            |
| 2022                                                                                                                    |                |                                                                                            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА № 001                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                |
| Общие требования                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Всего листов 8 |
| <p><b>Общие требования</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Воздухоочистительные композиционные фильтры предназначены для очистки и селективного обеззараживания воздуха в помещениях социально-значимых объектов. Конструкции фильтров рамочного, коллекторного и насадочного типа могут быть использованы в системах вентиляции и кондиционирования воздуха любых типов.</li> <li>2. Фильтровальные картриджи обеспечивают очистку воздуха от пыли и механических примесей размером от 0,4 мкм, а также его обеззараживание на фильтровальной перегородке. Фильтровальная перегородка представляющей собой слоисто-каркасную намотку комплексных вискозно-углеродных, вискозно-полипропиленовых нитей, или комбинированных слоисто-каркасных структур иглопробивного вискозного материала и комплексных нитей, обладающих биоцидными свойствами.</li> <li>3. По назначению и эффективности очистки композиционные фильтры (название), в соответствии с ГОСТ Р ЕН 779-2014 относятся к фильтрам общего назначения тонкой очистки класса F7 - F9 или EU по ROVENT 4/9.</li> <li>4. Композиционные фильтры по конструктивному исполнению, в соответствии с ГОСТ 30528, относятся к ячейковым фильтрам различной модификации (рамочного, коллекторного и насадочного типа).</li> <li>5. Температурный режим эксплуатации композиционных фильтров от минус 50 до плюс 100 °С.</li> <li>6. Средства измерения и контрольно-измерительные приборы, используемые при производстве фильтров, должны быть поверены.</li> <li>7. Персонал, осуществляющий технологические операции изготовления, испытания и приёмки фильтров, должен быть обучен выполнению этих операций.</li> <li>8. Сырьевые материалы, поступающие в производство, должны соответствовать действующим на них НД (ГОСТ, ТУ и т.д.), пройти входной контроль и быть допущены в производство.</li> <li>9. Условия хранения сырьевых материалов должны исключать возможность их загрязнения или смешения с другими материалами с соблюдением требований к хранению, изложенных в НД на сырьевые материалы.</li> </ol> |                |



|                                                                                |                                                                                 |  |  |  |                                               |      |                       |                                                                                       |      |  |            |      |                                      |          |  |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|-----------------------------------------------|------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|--|------------|------|--------------------------------------|----------|--|
| ООО «ООО НИЭК»                                                                 |                                                                                 |  |  |  | ТП № 001                                      |      |                       |                                                                                       |      |  |            |      |                                      |          |  |
| Операция № 1. Производство композиционных воздухоочистительных фильтров «НИЭК» |                                                                                 |  |  |  |                                               |      |                       |                                                                                       |      |  |            |      |                                      | Лист 1-8 |  |
| №№<br>п.п.                                                                     | Наименование материала, ед. изм.                                                |  |  |  | ГОСТ, ТУ, НД                                  |      | Расход на<br>1 каркас | Наименование оборудования,<br>инструментов, приборов, приспособлений                  |      |  |            |      | Марка, тип, НД<br>или чертеж         |          |  |
| 1                                                                              | Основные материалы:                                                             |  |  |  |                                               |      |                       | 1 Весы электронные для статического<br>взвешивания до 10 кг, погрешность<br>± 0,1 кг. |      |  |            |      | ГОСТ 53228-2008                      |          |  |
| 1.1                                                                            | Нить полипропиленовая техническая,<br>г                                         |  |  |  | ТУ 2272-006-<br>96949559-2007<br>(или аналог) |      | 5                     | 2 Вытяжной шкаф для хранения<br>химреактивов                                          |      |  |            |      | Любая                                |          |  |
| 1.2                                                                            | Алкилдиметилбензиламмония хлорид<br>и его исходный 80% водный раствор.          |  |  |  | ТУ-9392-003-<br>48482528-99<br>(или аналог)   |      | 1,0<br>6              | -емкостиммерные(1000 мл; 50мл; 10 мл.).<br>5 Механическая мешалка                     |      |  |            |      | ГОСТ 1770-74<br>ГР.18.11.2021.000 ПС |          |  |
| 1.3                                                                            | Нить углеродная конструкционная, г                                              |  |  |  | ГОСТ 28008-88                                 |      | 10                    | 6 Стеллаж для хранения исходных<br>материалов.                                        |      |  |            |      | Металлический                        |          |  |
| 1.4                                                                            | Нить вискозная неокрашенная<br>центрифугального способа получения<br>в бобинах. |  |  |  | ГОСТ 8871-84                                  |      |                       | 7 Часы                                                                                |      |  |            |      | Любые                                |          |  |
| 1.5                                                                            | Иглопробивной вискозный нетканый                                                |  |  |  |                                               |      |                       | 8 Линейка металлическая до 1000 мм                                                    |      |  |            |      | ГОСТ 427-75                          |          |  |
|                                                                                | РАБОЧИЕ, ПРОФЕССИЯ                                                              |  |  |  | Кол-во                                        |      |                       | Норма<br>времени,<br>чел.·ч                                                           |      |  |            |      | Любой                                |          |  |
| 1                                                                              | Аппаратчик                                                                      |  |  |  | 2                                             |      | 4                     |                                                                                       |      |  |            |      | Любая                                |          |  |
| 2                                                                              | Слесарь                                                                         |  |  |  | 1                                             |      | 0,2                   |                                                                                       |      |  |            |      | Металлический                        |          |  |
| 3                                                                              | Контролёр ОТК                                                                   |  |  |  | 1                                             |      | 0,2                   |                                                                                       |      |  |            |      | Типа Matrix 78308                    |          |  |
|                                                                                |                                                                                 |  |  |  |                                               |      |                       |                                                                                       |      |  | Разработал | Дата | Проверил                             | Дата     |  |
|                                                                                |                                                                                 |  |  |  |                                               |      |                       |                                                                                       |      |  | Панин      |      |                                      |          |  |
|                                                                                |                                                                                 |  |  |  | Изм.                                          | Лист | № докум.              | Подп.                                                                                 | Дата |  |            |      |                                      |          |  |

| ООО «ООО НИЭК»                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | ТП № 001                                                                                      |                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Операция № 1. Производство композиционных воздухоочистительных фильтров «НИЭК» |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                               | Лист 6                                                                                                                      |
| №№<br>пере-<br>ходов                                                           | СОДЕРЖАНИЕ РАБОТ                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Оборудование,<br>приспособление,<br>инструмент                                                | Технический контроль                                                                                                        |
| 1                                                                              | Подготовка материалов                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ножницы                                                                                       |                                                                                                                             |
| 1.1                                                                            | Пропитка нитей в мотальных паковка пористой структуры раствором антимикробного препарата;                                                                                                                                                                                                                    | Устройство нанесения барабанного типа                                                         |                                                                                                                             |
| 1.2                                                                            | Приготовление эпоксидного раствора для точечной пропитки углеродной нити профильным валиком                                                                                                                                                                                                                  | Весы,<br>мерная ёмкость                                                                       |                                                                                                                             |
| 1.2.1                                                                          | Подготовить навеску компонентов А и В,                                                                                                                                                                                                                                                                       | Весы,<br>мерная ёмкость                                                                       |                                                                                                                             |
| 1.1.4                                                                          | Смешать навеску компонентов А и В, смолы изопропилового в металлической ёмкости. Смешение компонентов в ёмкости осуществлять в течение 5 минут, не менее, до получения однородного раствора. Рецептuru и режим приготовления эпоксидного раствора записать в журнал.                                         | Лопатка деревянная,<br>ёмкость для эпоксидного раствора,<br>часы                              | Смешение компонентов в течение 5 минут, не менее<br>Рецептуру и режим приготовления эпоксидного раствора записать в журнал. |
| 1.2                                                                            | Подготовка оборудования к работе.                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                               |                                                                                                                             |
| 1.2.1                                                                          | Проверить температуру в помещении. При температуре ниже 16 °С, необходимо повысить температуру до 16 °С и более с применением                                                                                                                                                                                | градусник                                                                                     | Температура в помещении – 16 °С, не ниже                                                                                    |
| 1.2.2                                                                          | любого нагревательного оборудования.                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                               |                                                                                                                             |
| 1.3                                                                            | Формирование композиционных фильтровальных картриджей<br>Заправка нитей через направляющие органы машины по технологической схеме рисунок 1 и настройка мотального оборудования для формирования оптимальных структур фильтровальных перегородок на основе волокон и нитей обладающих биоцидными свойствами. | Мотальная машина «Foster» (США), модернизированная для намотки мотальных паковок специального |                                                                                                                             |

|     |                                              |                                                               |      |                         |          |
|-----|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|-------------------------|----------|
| 1.4 | Контроль типоразмеров изготовленных фильтров | назначения, в том числе картриджей фильтров заданных размеров |      | Линейка, штангенциркуль |          |
| 1.5 | Монтаж фильтров в корпуса                    | Инструмент: шестигранники, гаечные ключи                      |      |                         |          |
|     |                                              |                                                               |      | Разработал              | Дата     |
|     |                                              |                                                               |      |                         | Проверил |
|     |                                              | Изм.                                                          | Лист | № докум.                | Дата     |
|     |                                              |                                                               |      | Подп.                   | Дата     |
|     |                                              |                                                               |      |                         |          |

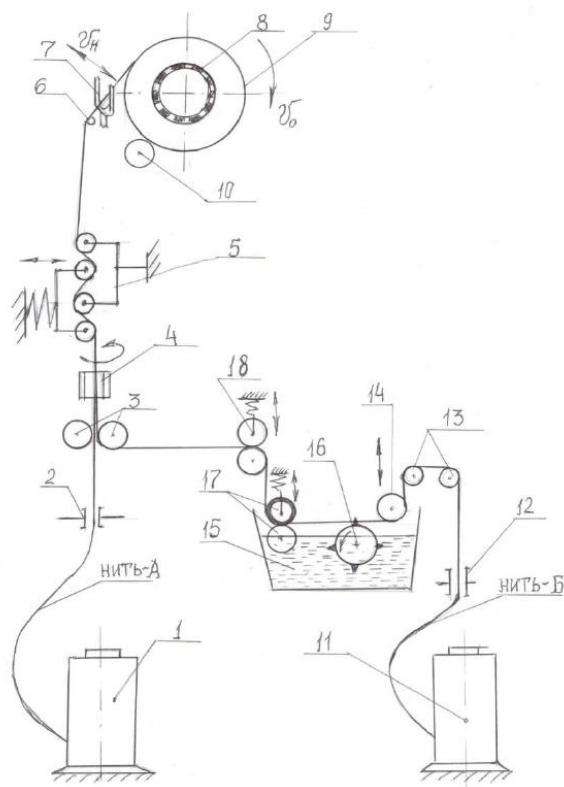


Рисунок 1 – Технологическая схема заправки комплексной нити, или нитевидных материалов при формировании композиционных текстильных фильтров

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Технические условия на фильтры композиционные для очистки и обеззараживания воздуха

|        |              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------|--------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Изм. № | Подп. и дата |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Настоящие технические условия распространяются на воздухоочистительные композиционные фильтры, представляющие собой корпуса рамочного, коллекторного и насадочного типа, с размещенными в них композиционными фильтровальными картриджами, формируемыми из фильтровального материала с биоцидными свойствами в виде комплексных нитей и/или иглопробивного нетканого полотна.

Воздухоочистительные композиционные фильтры предназначены для очистки и селективного обеззараживания воздуха в помещениях социально-значимых объектов. Конструкции фильтров рамочного, коллекторного и насадочного типа могут быть использованы в системах вентиляции и кондиционирования воздуха любых типов.

Фильтровальные картриджи обеспечивают очистку воздуха от пыли и механических примесей размером от 0,4 мкм, а также селективного его обеззараживание на фильтровальной перегородке. Фильтровальная перегородка представляющей собой слоисто-каркасную намотку комплексных вискозно-углеродных, вискозно-полипропиленовых нитей, или комбинированных слоисто-каркасных структур иглопробивного вискозного материала и комплексных нитей, обладающих биоцидными свойствами.

По назначению и эффективности очистки композиционные фильтры (название), в соответствии с ГОСТ Р ЕН 779-2014 относятся к фильтрам общего назначения тонкой очистки класса F7 - F9 или EU по ROVENT 4/9.

Композиционные фильтры по конструктивному исполнению, в соответствии с ГОСТ 30528, относятся к ячейковым фильтрам различной модификации (рамочного, коллекторного и насадочного типа).

Температурный режим эксплуатации композиционных фильтров от минус 50 до плюс 100 °С.

Пример записи композиционного фильтра при его заказе и (или) в других документах : «*Фильтр воздушный «НИЭК»*»

Воздухоочистительные фильтры (*Фильтр воздушный «НИЭК»*) применяют при очистке воздуха от пыли и селективного обеззараживания от болезнетворных бактерий (которые могут входить в состав аэрозолей).

**Фильтры воздушные «НИЭК» могут выпускаться в трех модификациях:**

- Фильтры рамочного типа представляют собой кластер из нескольких фильтрующих элементов, размещенных на едином плоском металлическом, деревянном или пластиковом каркасе.
- Фильтры коллекторного типа представляют собой кластеры из фильтрующих элементов, размещенных на пластиковом трубчатом коллекторе, или металлическом каркасе цилиндрической или прямоугольной формы.
- Фильтры насадочного типа представляют собой фильтровальные элементы цилиндрические формы различного диаметра, имеющие возможность совмещения один в другой для обеспечения многостадийной и более тонкой очистки и обеззараживания воздуха.

Ссылочные нормативные документы приведены в приложении А.

|              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|
| Изм. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата |
| Изм. № инв.  | Подп. и дата | Изм. № инв.  |

## 1 Технические требования

- 1.1 Фильтр воздушный «НИЭК» всех модификаций изготавливают в соответствии с требованиями настоящих технических условий.
- 1.2 Фильтровальный материал (в виде комплексных нитей и иглопробивного нетканого материала) с биоцидными свойствами производят в соответствии с технологическим регламентом.
- 1.3 Сборка фильтров должна производиться в соответствии с технологическим паспортом предприятия-изготовителя.

### 1.4 Основные параметры и характеристики

#### 1.4.1 Фильтр воздушный «НИЭК» всех модификаций должен отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать стабильную работу при температуре рабочей среды: от -40°C до +100°C;
- иметь пропускную способность: от 1500 м<sup>3</sup>/час и выше (путем создания требуемой структуры намотки многослойной фильтровальной перегородки или многослойного волокнистого композиционного мата);
- обеспечить эффективность очистки от пыли размером от 0,4 мкм: от 80 до 90% (фильтр тонкой очистки по ГОСТ Р ЕН 779-2014);
- обеспечить эффективность очистки от пыли размером от 1 мкм: от 90 до 95%;
- эффективность инактивации микроорганизмов в т.ч. спор грибов и бактерий, не менее: 95% – для помещений класса А, 90% – для помещений класса Б и инфекционных отделений (класс В), согласно СанПиН 2.1.3.2630-10 п.6.20, п.6.24.

#### 1.4.2 Габаритные размеры фильтров трех модификаций:

- Рамочного типа: 0,5 х 0,5 х 0,5 м.
- Коллекторного типа: 0,3 х 0,3 х 0,6 м.
- Насадочного типа: 0,15 х 0,15 х 1,0 м.
- Возможно изменение размеров по требованию Заказчика

1.4.3 Внешний вид воздушных фильтров «НИЭК» должен соответствовать образцам – эталонам, разработанных Производителем.

|              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|
| Изм. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата |
| Изм. № подл. | Подп. и дата | Изм. № подл. |

### 1.5 Требования к конструкции

- Фильтры рамочного типа представляют собой кластер из нескольких фильтрующих элементов, размещенных на едином плоском металлическом, деревянном или пластиковом каркасе.
- Фильтры коллекторного типа представляют собой кластеры из фильтрующих элементов, размещенных на пластиковом трубчатом коллекторе, или металлическом каркасе цилиндрической или прямоугольной формы.
- Фильтры насадочного типа представляют собой фильтровальные элементы цилиндрические формы различного диаметра, имеющие возможность совмещения один в другой для обеспечения многостадийной и более тонкой очистки и обеззараживания воздуха.

1.5.1 Конструкция фильтров должна обеспечивать простоту сборки и разборки, удобство проведения технического ремонта и обслуживания.

### 1.6 Требования к сырью, материалам и покупным изделиям

1.6.1 Материалы, применяемые для изготовления композиционных фильтров рамочного, коллекторного и насадочного типа, должны соответствовать требованиям действующей на них нормативной документации и включать документы, удостоверяющие их качество.

1.6.2 Картриджи - основание воздушных композиционных фильтров изготавливаются из металлической оцинкованной сетки по ТУ 14-4-1284-84

1.6.3 Фильтровальный слой для очистки и обеззараживания воздуха изготавливается из комплексных нитей (вискозно-углеродных или вискозно-полипропиленовых) и иглопробивного нетканого материала, обладающими биоцидными свойствами. Качество нитей всех типов должно быть подтверждено документами поставщиков:

- полипропиленовая нить (волокно) по ТУ 2272-006-96949559-2007 или аналог;
- вискозная нить (волокно) по ГОСТ 8871-84 или аналог;
- углеродная нить (волокно) по ГОСТ 28008-88 или аналог;

1.6.4 Антимикробный препарат импрегнируемый к фильтровальному волокнистому слою - алкилдиметилбензиламмония хлорид и его исходный 80% водный раствор по ТУ-9392-003-48482528-99 или аналог.

### 1.7 Комплектность

В комплект поставки фильтров должны входить:

- Комплект фильтров – 1 шт.
- Паспорт – 1 шт.

|        |       |              |              |              |
|--------|-------|--------------|--------------|--------------|
| Изм. № | Подп. | Изм. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата |
|        |       |              |              |              |

- Крепления по заявке Заказчика – 1 комплект.
- Упаковочно-информационный лист (необязательно) – 1 экз.

### 1.8 Маркировка

1.8.1 В комплекте поставки должен быть маркировочный лист, содержащий следующее описание (наименование товара, наименование страны изготовителя, наименование фирмы изготовителя, юридический адрес изготовителя, срок эксплуатации) ГОСТ Р 51121 - 97

### 1.9 Упаковка

1.9.1 Фильтры должны быть (каждый фильтр) упакованы в отдельные полиэтиленовые рукава (при больших габаритных размерах фильтров), или в пакеты с фигурными палетками по 10 штук (при малых габаритных размерах фильтров), а крепёжные элементы в потребительскую тару – полиэтиленовые мешки или коробки из картона по ГОСТ 7933.

1.9.2 В качестве транспортной тары для фильтров могут использоваться деревянные поддоны.

1.9.3 Паспорт по эксплуатации фильтров должны быть вложены в упаковку, или пакет из пленки полиэтиленовой по ГОСТ 10354-82

## 2. Правила приемки

2.1 Входной контроль и приемка покупных изделий и материалов должны осуществляться на соответствии требованиям раздела 1.4, 1.5 настоящих технических условий.

2.2 Качество применяемых материалов должно быть подтверждено сопроводительной документацией (сертификатами, паспортами и т.п.)

2.3 На предприятии – изготовителе должен проводиться пооперационный контроль отдельных элементов фильтров и крепежа в соответствии с технологической документацией на Заказ.

## 3. Методы контроля

3.1 Требования к покупным изделиям и материалам проверяют: по сопроводительным документам (сертификатам соответствия, паспортам).

3.2 Комплектность фильтров должна соответствовать требованиям п. 1.7 настоящих ТУ.

3.3 Контроль маркировки, упаковки фильтров проводят визуально.

3.4 Методы контроля воздухопроницаемости по ГОСТ 3810-17.

3.5 Пористость определяется микрометром - ГОСТ 6507

3.6 Размер фильтров наружный и внутренний контролируется линейкой и штангенциркулем по ГОСТ 166 – 80.

|              |  |
|--------------|--|
| Подп. и дата |  |
| Взам. инв. № |  |
| Инв. № дубл. |  |
| Подп. и дата |  |
| Инв. № подл. |  |

#### 4 Транспортирование и хранение

4.1 Упакованные фильтры транспортируют любым видом транспорта и на любое расстояние в соответствии с правилами перевозок грузов, действующих на данном виде транспорта, без ограничения скорости и высоты перемещения.

4.2 Фильтры хранят в отапливаемых помещениях при температуре от минус 40 до плюс 40°C (условия хранения (С) по ГОСТ 15150).

#### 5 Указания по монтажу и эксплуатации

Эксплуатация и монтаж проводится в соответствие с паспортом по эксплуатации, входящими в комплект поставки.

#### 6 Гарантии изготовителя

6.1 Изготовитель гарантирует качество фильтров требованиям настоящих технических условий при соблюдении условий транспортирования, хранения, монтажа и эксплуатации.

6.2 Гарантийный срок эксплуатации фильтров – 1 год.

|             |              |             |              |              |
|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| Ив. № подл. | Подп. и дата | Ив. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата |
|             |              |             |              |              |

**Приложение А**  
**(справочное)**

**Перечень использованных нормативных документов**

| № п/п | Обозначение нормативного документа     | Наименование нормативного документа                                                                                                                                                                                                 |
|-------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | ГОСТ 7933-89                           | Картон для потребительской тары. Общие технические условия.                                                                                                                                                                         |
| 2     | ГОСТ 10354-82                          | Пленка полиэтиленовая. Технические условия.                                                                                                                                                                                         |
| 3     | ТУ 2272-006-96949559-2007 (или аналог) | Нить полипропиленовая техническая                                                                                                                                                                                                   |
| 4     | ГОСТ ISO 1346-2007                     | Изделия канатные из полипропиленовых фибриллированных пленочных нитей, монопнитей, мультифиламентных нитей (ПП2) и полипропиленовых мультифиламентных нитей высокой прочности (ПП3) 3-, 4-, и 8-прядные. Общие технические условия. |
| 5     | ГОСТ 3810-17                           | Методы контроля воздухопроницаемости                                                                                                                                                                                                |
| 6     | ГОСТ 15150-69                          | Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.               |
| 7     | ГОСТ 8871-84                           | Нить вискозная неокрашенная центрифугального способа получения в бобинах                                                                                                                                                            |
| 8     | ГОСТ 28008-88                          | Нить углеродная конструкционная                                                                                                                                                                                                     |
| 9     | ТУ-9392-003-48482528-99 (или аналог)   | Алкилдиметилбензиламмония хлорид и его исходный 80% водный раствор                                                                                                                                                                  |
| 10    | ТУ 14-4-1284-84 (или аналог)           | Сетки проволочные сварные непокрытые и оцинкованные                                                                                                                                                                                 |
| 11    | ГОСТ Р ЕН 779-2014                     | Национальный стандарт. "Фильтры очистки воздуха общего назначения.                                                                                                                                                                  |

|              |  |
|--------------|--|
| Подп. и дата |  |
| Взам. инв. № |  |
| Инв. № дубл. |  |
| Подп. и дата |  |
| Инв. № подл. |  |

[illegible]

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Результаты испытаний воздушного фильтра на степень биологической и тонкой очистки воздуха

Ф 05-0-99-01-2021

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека  
**Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения**  
**«Центр гигиены и эпидемиологии в Ульяновской области»**  
**(ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ульяновской области»)**  
**Испытательный лабораторный центр**  
Юридический адрес: Пушкирева ул., д.5, г.Ульяновск, 432049 тел./факс (8422) 40 56 63, e-mail info@73fguz.ru  
Реквизиты: ОКПО 01948994 ОГРН 1057325039782 ИНН/КПП 7325053960/732701001

**Испытательная лаборатория**  
**Филиал Федерального бюджетного учреждения**  
**здравоохранения «Центр гигиены и**  
**эпидемиологии в Ульяновской области в**  
**г.Димитровграде»**  
**(Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и**  
**эпидемиологии в Ульяновской области в**  
**г.Димитровграде»)**  
ОКПО 01948994, ОГРН 1057325039782  
ИНН 7325053960/КПП 730203001  
г.Димитровград, ул.Мелекесская, 39; 433508  
тел./факс (84235) 2-61-01, e-mail sanepid-dgrad@73fguz.ru

**УТВЕРЖДАЮ**  
**Руководитель (заместитель руководителя)**  
**испытательного лабораторного центра**  
  
**Е. П. Малышева**  
« 15 » 03 20 22 г.

**Аттестат аккредитации ИЛЦ**  
№ RA.RU.510135 от 20 октября 2015 года  
**Лицензия на медицинскую деятельность**  
№ ФС-73-01-000715 от 02 декабря 2019 года

### ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ (ИЗМЕРЕНИЙ)

№ П2268 от 15 марта 2022 г.

1. Наименование предприятия, организации (заявитель): ООО "ООО НИЭК"
2. Юридический адрес: РОССИЯ, Московская область, Г.О.Люберцы, мкр.Зенитно ЖК Самолет, ул.Вертолетная, д.14, к.2, оф.163
3. Наименование образца (пробы): Воздух закрытых помещений (микробная обсемененность)
4. Место отбора: ООО "ООО НИЭК", Ульяновская область, г.Димитровград, ул.Куйбышева, 226 А/1

#### 5. Условия отбора, доставки

Дата и время отбора: 09.03.2022 в 10:00

Ф.И.О., должность: Архипова Е. И. помощник врача

Условия доставки: соответствуют ИД

Дата и время доставки в ИЛЦ: 09.03.2022 11:50

Пробы отобраны в соответствии с МУК 4.2.2942-11 Методы санитарно-бактериологических исследований объектов окружающей среды, воздуха и контроля стерильности в лечебных организациях..

#### 6. Средства измерений:

| № п/п | Тип прибора                    | Заводской номер | № свидетельства о поверке                 | Срок действия |
|-------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|---------------|
| 1     | Устройство пробоотборное ПУ-1Б | 2332            | № С-ВЫ/12-01-2022/122903066 от 12.01.2022 | 11.01.2023    |

#### 7. Дополнительные сведения:

Цель исследований, основание: По заявлению, заявка № 204 ОЛД от 09.03.2022

При отборе присутствовал представитель объекта: доктор тех.наук, профессор Панин И.Н., кандидат биол.наук, доцент Москвитин А.А.

Проба доставлена автотранспортом в сумке-термос при t +5°C.

#### 8. ИД, регламентирующие объем лабораторных испытаний и их оценку:

9. Код образца (пробы): 12.22.2268 18.2

10. Место осуществления деятельности: 433508 г.Димитровград, ул.Мелекесская, 39

11. Условие проведение испытаний: Условия проведения испытаний соответствуют нормативным требованиям

12. ИЛЦ (ИЛ) не несет ответственность за информацию предоставленную заказчиком

Протокол № П2268 распечатан 15.03.2022

Результаты относятся к образцам (пробам), прошедшим испытания  
Настоящий протокол не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения ИЛЦ

стр. 1 из 3

## Результаты испытаний

| Рег. номер                                                                     | Место отбора                                                                                                                                                                                                                                        | Определяемые показатели      | Ед. измерения | Результаты испытаний            | Величина допустимого уровня | НД на методы исследований |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Образцы поступили 09.03.2022 12:00                                             |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                                 |                             |                           |
| дата начала испытаний 09.03.2022 12:00 дата выдачи результата 15.03.2022 14:49 |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                                 |                             |                           |
| ООО "ООО ННЭК"                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                                 |                             |                           |
| 2268/1                                                                         | Образец №1 воздуха закрытого помещения до его пропускания через нетканый фильтровальный вискозный материал, волокна и нити, импрегнированные многокомпонентной смесью с различным содержанием алкил(C10-C18) N,N-диметил-N-бензиламмония хлорида    | Бактерии рода Staphylococcus | КОЕ/м3        | Staphylococcus saprophyticus 20 | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                     | Плесени                      | КОЕ/м3        | 200                             | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                     | Общее микробное число        | КОЕ/м3        | 400                             | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
| ООО "ООО ННЭК"                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                                 |                             |                           |
| 2268/2                                                                         | Образец №2 воздуха закрытого помещения после его пропускания через нетканый фильтровальный вискозный материал, волокна и нити, импрегнированные многокомпонентной смесью с различным содержанием алкил(C10-C18) N,N-диметил-N-бензиламмония хлорида | Бактерии рода Staphylococcus | КОЕ/м3        | не обнаружено                   | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                     | Плесени                      | КОЕ/м3        | 16                              | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                     | Общее микробное число        | КОЕ/м3        | 20                              | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
| ООО "ООО ННЭК"                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                                 |                             |                           |
| 2268/3                                                                         | Образец №3 воздуха закрытого помещения после его пропускания через нетканый фильтровальный вискозный материал, волокна и нити, импрегнированные многокомпонентной смесью с различным содержанием алкил(C10-C18) N,N-диметил-N-бензиламмония хлорида | Бактерии рода Staphylococcus | КОЕ/м3        | не обнаружено                   | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                     | Плесени                      | КОЕ/м3        | не обнаружено                   | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                     | Общее микробное число        | КОЕ/м3        | 20                              | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
| ООО "ООО ННЭК"                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                                 |                             |                           |
| 2268/4                                                                         | Образец №4 воздуха закрытого помещения после его пропускания через нетканый фильтровальный вискозный материал, волокна и нити, импрегнированные многокомпонентной смесью с различным содержанием алкил(C10-C18) N,N-диметил-N-бензиламмония хлорида | Бактерии рода Staphylococcus | КОЕ/м3        | Staphylococcus saprophyticus 8  | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |

Протокол № П2268 распечатан 15.03.2022

стр. 2 из 3

Результаты относятся к образцам (пробам), прошедшим испытания  
Настоящий протокол не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения ИЛЦ

| Рег. номер                                                                         | Место отбора                                                                                                                                                                                                                                        | Определяемые показатели      | Ед. измерения | Результаты испытаний | Величина допустимого уровня | НД на методы исследований |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                     | Плесени                      | КОЕ/м3        | не обнаружено        | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                     | Общее микробное число        | КОЕ/м3        | 0                    | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
| ООО "ООО ННЭК"                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                      |                             |                           |
| 2268/5                                                                             | Образец №5 воздуха закрытого помещения после его пропускания через нетканый фильтровальный вязкозный материал, волокна и нити, импрегнированные многокомпонентной смесью с различным содержанием алкил(C10-C18) N,N-диметил-N-бензиламмония хлорида | Бактерии рода Staphylococcus | КОЕ/м3        | не обнаружено        | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                     | Плесени                      | КОЕ/м3        | не обнаружено        | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
|                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                     | Общее микробное число        | КОЕ/м3        | 0                    | не нормируется              | МУ 4.2.2942-11            |
| ФИО лица, ответственного за проведение испытаний: Вишнева Н. Н., фельдшер-лаборант |                                                                                                                                                                                                                                                     |                              |               |                      |                             |                           |

Подпись, Ф.И.О., должность лица,

ответственного за оформление протокола:  Манухина Я. А. инженер

**Испытательная лаборатория «Вега-тест»**  
 Аттестат РОСС RU.31578.04ОЛН0.ИЛ23  
 Срок действия с 31.01.2022 года по 30.01.2025 года  
 Адрес: 144007, Россия, Московская область, г. Электросталь, улица Мира, 27с4

Утверждаю:  
 Начальник лаборатории

И.Н. Смирнов  
 02.11.2022 года

**ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ**  
 № 001/F-02/11/22 от 02.11.2022 года

|                                                  |                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Заказчик испытаний, адрес заказчика <sup>1</sup> | ООО "ООО НИЭК". Адрес: 140016, Московская область, г. Люберцы, мкр. Зенино ЖК Самолёт, Вертолетная ул, д. 14 к. 2, кв. 163 |
| Наименование объекта испытаний <sup>1</sup>      | Фильтр воздушный «НИЭК»                                                                                                    |
| Изготовитель <sup>1</sup>                        | ООО "ООО НИЭК". Адрес: 140016, Московская область, г. Люберцы, мкр. Зенино ЖК Самолёт, Вертолетная ул, д. 14 к. 2, кв. 163 |
| План (метод) отбора образцов <sup>1</sup>        | Отбор образцов произведен в соответствии с ГОСТ Р 58972-2020, акт отбора образцов № 001/F-02/11/22                         |
| Идентификационный номер образца                  | № 001/F-02/11/22                                                                                                           |
| Испытания проведены на соответствие требованиям  | ТУ 4863-001-52976621-2022                                                                                                  |

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**

Инженер-испытатель: Н.И. Назаров

| Показатель (характеристика)                                                  | Методика испытаний | Нормируемое значение | Результат испытаний |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| 1                                                                            | 2                  | 3                    | 4                   |
| Средняя эффективность для частиц с размером 0,4 мкм, %                       | ГОСТ Р ЕН 779-2014 | 80-90                | 84                  |
| Испытания фильтров проводились при расходах воздуха от 0,55 м3/с (2000 м3/ч) |                    |                      |                     |

**Примечания:**

1. Протокол испытаний распространяется только на образцы, прошедшие испытания. Результаты испытаний относятся к предоставленным Заказчиком образцам.
2. Протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения испытательной лаборатории.
3. Методики проведения испытаний включены в Перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технических регламентов.

**ОКОНЧАНИЕ ПРОТОКОЛА ИСПЫТАНИЙ**

<sup>1</sup> Информация представлена заказчиком

Протокол испытаний № 001/F-02/11/22 от 02.11.2022 года

Лист 1 из 1

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6**

Протоколы испытаний углерод - углеродного композиционного материалы  
выполненного методом развертки.

стр. 1 из 1

**Испытательный центр**

АО «НИИГРАФИТ»

111524, Россия, Москва, Электродная ул., 2, тел. 8 916 015 2420, мест. 22-47

E-mail: ValSapozhnikov@rosatom.ru

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ № 342**

26 апреля 2024 г.

**Определение плотности гидростатическим методом****Заказчик: ОРНТ УУКМ**

Отбор проб осуществлен заказчиком.

Определение проводили: весы Vibra

Результаты представлены в таблице.

Материал: 2D-развёртка

| Образец          | Плотность, г/см <sup>3</sup> |
|------------------|------------------------------|
| 1                | 1,85                         |
| 2                | 1,86                         |
| 3                | 1,84                         |
| 4                | 1,86                         |
| 5                | 1,87                         |
| среднее значение | 1,86                         |

Начальник группы ФХМИ



Сапозжников В.И.

Исполнитель



Малинина Ю.А.

**АО "НИИграфит"**  
**Испытательный центр**  
**Протокол испытания №764 от 13 декабря 2023г.**

**Таблица параметров:**

Заказчик : ОПНТ УКМ  
 Стандарт испытания : Определение предела прочности при сжатии по МИ 00200851-336-2013  
 Материал : Материал - Аналог (РАЗБЕЖКА)  
 Марка испытательной машины : Zwick/Roell Z250  
 Скорость испытания : 5 mm/min  
 Влажность : 38%  
 Температура : 18C  
 Документ : Заявка вх. №495 от 13.12.2023

**Результаты:****Статистика:**

| Nr | Маркировка | Толщина a0<br>mm | Ширина b0<br>mm | A<br>mm <sup>2</sup> | Fмакс.<br>kN | σ max<br>MPa | Емод<br>GPa |
|----|------------|------------------|-----------------|----------------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | h=30mm     | 9,9              | 9,9             | 98,01                | 25,68        | 262,06       | 7,23        |
| 2  | h=30mm     | 9,89             | 9,85            | 97,42                | 24,33        | 249,74       | 7,53        |
| 3  | h=20mm     | 9,88             | 9,91            | 97,91                | 26,89        | 274,62       | -           |
| 4  | h=20mm     | 9,87             | 9,88            | 97,52                | 28,33        | 290,50       | -           |
| 5  | h=20mm     | 9,89             | 9,87            | 97,61                | 27,16        | 278,25       | -           |
| 6  | h=10mm     | 9,89             | 9,86            | 97,52                | 27,12        | 278,12       | -           |

| n = 6 | σ max<br>MPa |
|-------|--------------|
| x     | 272,21       |
| c     | 14,28        |
| v     | 5,25         |

Испытания проводил:

Руководитель направления группы НТМИ:

Конюшенков А.А.

ПРОТОКОЛ № 4063-24  
Определения коэффициента теплопроводности

|                                 |                                        |
|---------------------------------|----------------------------------------|
| 1. Заказчик                     | <u>ОРНТ УУКМ АО «НИИ графит»</u>       |
| 2. Номер заявки (договора)      | <u>№ 223/9151-Д</u>                    |
| 3. Объект (материал) испытаний  | <u>2-D развертка</u>                   |
| 4. Отбор образцов произведен    | <u>Заказчиком</u>                      |
| 5. Количество и размер образцов | <u>5 образцов, квадратного сечения</u> |
| 6. Дата испытания               | <u>26.04.24</u>                        |
| 7. Температура испытания.       | <u>T=25<sup>0</sup>C</u>               |

Результаты испытаний:

| Материал      | Коэффициент теплопроводности,<br>Вт/(м*К) |      |      |      |      | Среднее<br>значение |
|---------------|-------------------------------------------|------|------|------|------|---------------------|
|               | 1                                         | 2    | 3    | 4    | 5    |                     |
| 2-D развертка |                                           |      |      |      |      |                     |
| Z             | 13,2                                      | 13,6 | 14,4 | 14,5 | 13,0 | 13,7                |
| XY            | 55,3                                      | 51,5 | 57,6 | 58,0 | 56,2 | 55,7                |

Испытания провел

Начальник группы  
НТМИ ИЦ

 Л.В. Ким

 А.С. Круглова

**Протокол испытаний № 4065-24**  
**от 26.04.2024 года**  
**Определения удельного электросопротивления материала при**  
**температуре 293-303 К**

- 1 Испытание проведено по методике выполнения измерений  
МИ 00200851-339-2010
- 2 Средства измерений и испытательное оборудование: Установка по  
определению удельного электросопротивления
- 3 Условия испытания  $T=299\text{ К}$
- 4 Материал: 2D
- 5 Размер образцов  $10*10*70$

| № образца | $\rho, \text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ |
|-----------|--------------------------------------------|
|           | значение                                   |
| 1         | 17.9                                       |

Исполнитель

Начальник группы НТМИ ИЦ

 В.А. Воронцов

 А.С. Круглова

**Испытательный центр**

АО «НИИГРАФИТ»

111524, Россия, Москва, Электродная ул., 2, тел. 495 6627577

E-mail: ValSapozhnikov@rosatom.ru

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ № 101 .**

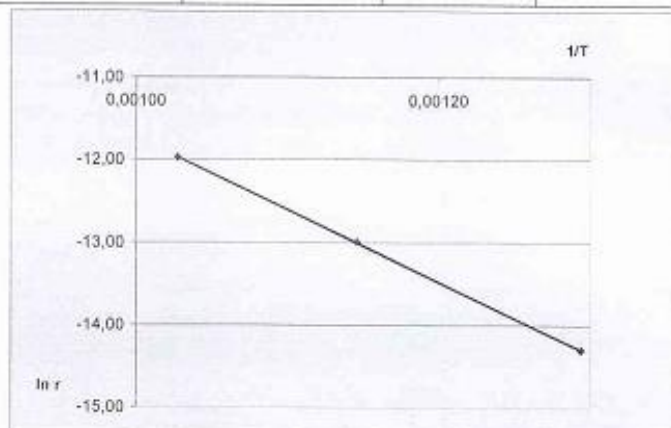
20.02.2023

Определение скорости окисления углеродного материала

**Заказчик:** ОРНТ УУКМ**Материал:** материал-аналог

Окисление образцов размером 10×10×10 мм проведено на установке окисления кислородом воздуха в проточных условиях при различных температурах. Нагрев образцов до заданной температуры и их охлаждение осуществлялись в токе аргона. Скорость реакции окисления рассчитана по потере веса образцов во время окисления.

| Материал        | Температура, °С, | Время окисления, мин | Скорость реакции окисления, $\cdot 10^{-6}$ г/г·с | Энергия активации, Ккал/моль |
|-----------------|------------------|----------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
| Материал-аналог | 500              | 120                  | 0,62                                              | 17,38                        |
|                 | 600              | 60                   | 2,30                                              |                              |
|                 | 700              | 30                   | 6,31                                              |                              |



Начальник группы ФХМИ

Исполнитель

Сапожников В.И.

Горина В.А.



**АО "НИИГрафит"**  
**Группа исследования физико-механических характеристик**  
**углеродных материалов**  
**Протокол испытания №479 от 08 декабря 2022г.**

**Таблица параметров:**

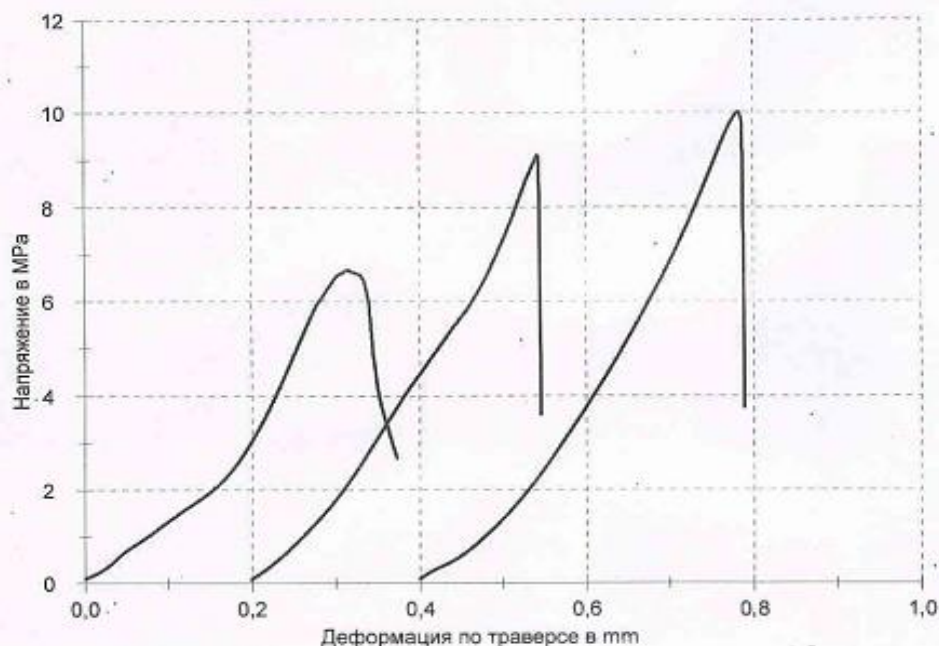
|                            |                                                                               |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Заказчик                   | : ОРНТ УУКМ                                                                   |
| Стандарт испытания         | : Определение предела прочности при межслоевом сдвиге по МИ 00200851-348-2013 |
| Материал                   | : материал - аналог                                                           |
| Марка испытательной машины | : Zwick/Roell Z250                                                            |
| Скорость испытания         | : 0,5 mm/min                                                                  |
| Влажность                  | : 21%                                                                         |
| Температура                | : 22С                                                                         |
| Документ                   | : Заявка вх.№315 от 08.12.2022                                                |

**Результаты:**

**Статистика:**

| в ПЛОСКОСТИ<br>R-ТЭТА | Толщина a0 | Ширина b0 | Fмакс. | τ max |
|-----------------------|------------|-----------|--------|-------|
| Nr                    | mm         | mm        | kN     | MPa   |
| 1                     | 19,84      | 19,89     | 2,63   | 6,67  |
| 2                     | 19,87      | 19,83     | 3,58   | 9,09  |
| 3                     | 19,87      | 19,83     | 3,94   | 10,01 |

| в ПЛОСКОСТИ<br>R-ТЭТА | τ max |
|-----------------------|-------|
| n = 3                 | MPa   |
| x                     | 8,59  |
| c                     | 1,72  |
| v                     | 20,04 |



Испытания проводил:

Начальник ГИ ФМХ УМ:

А.А.Конюшенков

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

### Акты внедрения разработанных композиционных фильтров

«Утверждаю»

Заместитель директора

по научной работе

Е.П. Цимбалюк

апреля 2023 года



#### АКТ

#### внедрения результатов законченной НИР в производство

Настоящий Акт составлен по итогам работы по Договору подряда № 2 от 01.03.2022. на НИОКР на тему: «Разработка технологии и изготовление композиционных фильтров для очистки и обеззараживания воздуха в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха социально-значимых объектов», выполненной ООО «ООО НИЭК» г. Люберцы Московской области под руководством к.т.н. Панина М.И.

В результате реализации условий Договора была проведена наработка и установка на предприятии 120 штук модульных композиционных фильтров ФЯК-0,5. Обеспечивающих очистку и обеззараживание воздуха, по цене (за один комплект) 13 500 (тринадцать тысяч пятьсот) рублей.

Общая сумма реализации составила 1 620 000 (один миллион шестьсот двадцать тысяч) рублей.

Главный технолог

Бухгалтер

Бояркина М.А.

Мельникова О.Н.

Акт внедрения изделий УУКМ выполненных методом 3D намотки в интересах  
АО «НИИГрафит» и ГК «Росатом»

Утверждаю

Директор химико-технологического блока

АО «Росатом Наука» - управляющей  
организации АО «НИИГрафит»

Голиней А.И.



АКТ

использования результатов НИР при производстве изделий  
из углерод-углеродного композиционного материала

Настоящий акт составлен о том, что технологическая операция «Формирование углеродных армирующих структур на базе прецизионных 3D намоток», разработанная в ходе выполнения научно-исследовательской работы в рамках проектов в интересах Госкорпорации «Росатом» (ответственный исполнитель – начальник отдела разработки новых типов УУКМ, к.т.н. М.И. Панин), используется при изготовлении заготовок из объемно армированного углерод-углеродного композиционного материала.

В 2023 г. по проектам с Госкорпорацией «Росатом» изготовлено 16 заготовок из объемно армированного углерод-углеродного композиционного материала. Заготовки прошли механическую обработку, паспортизованы и переданы заказчику.

Заместитель директора  
по науке и инновациям

А.Р. Гареев