

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

На правах рукописи

**Казаков Илья Александрович**

**Разработка технологии непрерывного  
формования осесимметричных композитных  
изделий методом пултрузии**

05.17.06. - Технология и переработка полимеров и композитов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
д.т.н. Красновский А.Н.

**Москва – 2016**

## Оглавление

Введение .....	4
1 Технология непрерывного формования осесимметричных изделий методом пултрузии .....	14
1.1 Преимущества пултрузии перед другими способами формования изделий из ПКМ .....	14
1.2 Применение осесимметричных длинномерных пултрузионных изделий .....	16
1.3 Описание процесса пултрузии .....	22
1.4 Математическое моделирование пултрузионного процесса (обзор литературы) .....	24
2 Объекты и методы исследования .....	32
2.1 Пултрузия стержней и труб .....	32
2.2 Безфильерный способ изготовления стержней (нидлтрузия) .....	36
3 Математическое моделирование процесса пултрузии для осесимметричных стержней и труб .....	40
3.1 Теплопроводность и отверждение связующего .....	40
3.1.1 Уравнение теплопроводности .....	40
3.1.2 Уравнение кинетики отверждения связующего .....	45
3.1.3 Решение задачи теплопроводности и отверждения связующего численным методом .....	48
3.2 Определение давления связующего .....	52
3.2.1 Определение давления связующего в фильере .....	52
3.2.2 Определение давления связующего в формующей втулке .....	57
3.3 Определение напряженно-деформированного состояния стержня в процессе пултрузии .....	61
3.3.1 Решение задачи определения НДС стержня численным методом .....	70
3.3.2 Критерий прочности материала .....	72
3.4 Определение усилия пултрузии стержня .....	73

4	Экспериментальная проверка результатов моделирования .....	76
4.1	Экспериментальная проверка моделирования температуры и степени отверждения связующего .....	76
4.2	Экспериментальная проверка результатов моделирования усилия протяжки.....	86
4.3	Определение кинетических и реологических параметров связующего для пултрузии стержней и труб .....	88
4.4	Определение напряженно-деформированного состояния стержней и труб малого диаметра при пултрузии.....	94
4.5	Определение напряженно-деформированного состояния стержней большого диаметра при пултрузии .....	100
5	Оптимизация технологического процесса пултрузии.....	105
5.1	Постановка задачи оптимизации .....	105
5.2	Оптимизация температурно-скоростного режима .....	108
5.2.1	Определение оптимального температурно-скоростного режима для пултрузии.....	108
5.2.2	Определение оптимального температурно-скоростного режима для безфильерного способа формования стержней .....	110
5.3	Оптимизация геометрии конусного участка фильеры.....	116
5.3.1	Пример оптимизации геометрии конусного участка фильеры для стержня большого диаметра.....	116
	Выводы .....	124
	Литература .....	126
	Приложение 1 – Акты о внедрении.....	140
	Приложение 2 – текст программы расчета температуры и степени отверждения композитной арматуры.....	143
	Приложение 3 – текст программы определения давления связующего .....	150
	Приложение 4 – программа по моделированию пултрузии.....	160

## Введение

Одним из наиболее ярких проявлений научно-технического прогресса в развитии материалов и технологий является разработка и применение полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающим очевидными преимуществами перед традиционными материалами. К таким преимуществам относятся высокая удельная прочность и жесткость, высокая коррозионная стойкость, способность выдерживать длительные знакопеременные нагрузки. Важнейшей особенностью ПКМ является возможность создавать элементы конструкций с заранее заданными свойствами, соответствующими условиям эксплуатации.

Среди различных способов изготовления изделий из композиционных материалов (прессование, намотка, пропитка под давлением и др). необходимо особо выделить пултрузию как самый эффективный метод получения высокопрочных длинномерных композиционных изделий постоянного сечения. Метод заключается в том, что предварительно пропитанные полимерной композицией волокна (стеклянные, углеродные, базальтовые, арамидные) проходят через нагретую фильеру, где происходит удаление избыточного материала в процессе формования будущего изделия и его отверждение, после чего на выходе из фильеры изделие разрезается на элементы заданной длины. Пултрузионные осесимметричные изделия находят применение в различных сферах народного хозяйства, поэтому актуальность исследования процесса пултрузии не вызывает сомнений. Примерами таких изделий являются:

- строительная арматура;
- кабельная продукция;
- электроизоляционные стержни;
- трубы;
- конструкционные элементы композитных мостов и др.

В настоящее время создаются эффективные технологии и линии для непрерывного формообразования длинномерных изделий из ПКМ.

Проектирование пултрузионного оборудования, а также отладку самого технологического процесса невозможно представить без математического моделирования. Математическая модель позволяет оптимизировать необходимые критерии пултрузионного процесса, рассчитать конструктивные параметры оборудования с целью повышения качества изделий, повышения производительности оборудования и снижения себестоимости производства. В этой связи, наиболее актуальным направлением научных исследований является разработка математической модели непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии.

**Степень разработанности темы.** Существенный вклад в исследование процесса пултрузии внесли отечественные и зарубежные ученые: Абрамов И.В., Виноградов В.М., Жовнер Б.А., Царев В.Ф., Петров А.В., Ставров В.П., Ушаков А.Е., Сафонов А.А., Бужгулашвили В.А., Кленин Ю.Г., Price H., Gutowski T. G., Han C. D., Tulig T. J., Batch G. L., Gorthala R., Chachad Y. R., Kim D. H., Roux J. A., Atarsia, A. и др. Анализ публикаций показал, что большинство исследователей проводили численные и экспериментальные исследования по отдельным аспектам, присущим пултрузии, ориентируясь в основном на вопросы, связанные с теплопроводностью и отверждением связующего, определением давления при удалении избыточного материала, усилия пултрузии. Отдельно выделяются работы по описанию процесса возникновения остаточных напряжений и деформаций в композиционном материале, однако не приводятся конкретные результаты для вычисления напряжений и деформаций, возникающих в крупногабаритных пултрузионных стержнях в процессе их изготовления. Существуют отдельные исследования процесса теплопередачи от инфракрасного (ИК) нагревателя к изделию при автоклавном формовании. Для процесса пултрузии (безфильтрного способа изготовления композитных стержней) оптимизация температурных режимов с помощью печей с ИК нагревателями не осуществлялась. В существующих работах по оптимизации процесса пултрузии проведена оптимизация температурно-скоростного режима без учета критериев

прочности материала. Отсутствует математическая модель определения давления связующего при подаче материала через кольцевую раскладочную гребенку.

Таким образом, существующие математические модели пултрузии имеют ограниченные возможности. Поэтому разработка модели процесса непрерывного формования осесимметричных изделий из ПКМ является актуальной задачей для современной промышленности.

**Целью работы** является повышение производительности пултрузионного оборудования и качества осесимметричных композиционных изделий на основе математического моделирования процесса и научно обоснованных технических и технологических решений.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- установить взаимосвязи между температурой, степенью отверждения, давлением связующего, напряженно-деформированным состоянием, усилием пултрузии для изделия любого диаметра (в том числе крупногабаритного) при различных входных данных;
- разработать математическую модель пултрузии осесимметричных крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов;
- разработать программу, позволяющую определить совокупность параметров технологического процесса для получения осесимметричных крупногабаритных изделий из ПКМ методом пултрузии;
- определить оптимальные температурно-скоростные режимы пултрузии на основе проведенных экспериментов в лабораторных и заводских условиях;
- определить оптимальные конструктивные параметры оборудования (угол конуса входного участка фильеры, длина конусного участка);
- использовать результаты теоретических и экспериментальных исследований при создании новых технологических решений, повышающих производительность процесса и качество изготавливаемых композитных изделий.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении оптимальных конструктивных параметров оборудования и температурно-скоростных режимов пултрузии на основе установления взаимосвязей между технологическими, конструктивными параметрами оборудования и физико-механическими, тепло-физическими и физико-химическими параметрами композиционного материала.

**Практическая значимость работы** заключается в рекомендациях по оптимизации параметров процесса пултрузии; разработанных новых технологических и технических решениях, повышающих производительность процесса и качество пултрузионных стержней и труб.

**Методы исследования.** В рамках настоящей диссертационной работы применялись методы термодинамики, химической кинетики, гидромеханики, строительной механики, механики композиционных материалов и теории упругости. Численное интегрирование и дифференцирование в основе разработанных компьютерных программ выполнялось методом конечных разностей. При исследовании кинетических и реологических свойств связующих в лабораторных условиях использовались методы дифференциальной сканирующей калориметрии и вискозиметрии. В производственных условиях для измерения температур и усилия пултрузии использовалось опытно-промышленное оборудование для непрерывного формования и современные измерительные средства. Обработка результатов экспериментов проводилась компьютерными и программными средствами вычислительной техники.

**На защиту выносятся:**

- математическая постановка задачи определения технологических и конструктивных параметров оборудования для производства осесимметричных изделий методом пултрузии, предусматривающая определение температуры, степени отверждения, давления связующего, напряженно-деформированного состояния, усилия пултрузии;
- математическая модель пултрузии осесимметричных композиционных изделий, включающая модули определения температуры, степени

отверждения, давления связующего, напряженно-деформированного состояния материала, усилия пултрузии;

- установленное оптимальное соотношение между температурно-скоростными параметрами режима пултрузии и конструктивными параметрами фильеры (угол конуса входного участка фильеры, длина конусного участка).

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Работа соответствует формуле специальности 05.17.06 – «Технология и переработка полимеров и композитов» в области «полимерные материалы и изделия; пластмассы, волокна, каучуки, покрытия, клеи, компаунды, получение композиций, прогнозирование свойств, фазовые взаимодействия, исследования в направлении прогнозирования состав-свойства, гомогенизация композиции, процессы изготовления изделий (литье, формование, прессование, экструзия и т.д.), процессы, протекающие при этом, последующая обработка с целью придания специфических свойств, модификация, вулканизация каучуков, отверждение пластмасс, синтез сетчатых полимеров» в полном соответствии с п. 2 области исследования паспорта специальности.

### **Научная новизна** заключается в:

- разработанных математических моделях: а) теплопроводности и отверждения материала, учитывающей наличие нагреваемых конических участков фильеры и различные источники нагрева (передача тепла непосредственно от стенок фильеры, нагрев поверхности стержня ИК нагревателем); б) давления связующего во входном коническом участке фильеры для двух вариантов подачи материала (равномерным пучком и через кольцевую раскладочную гребенку); в) напряженно-деформированного состояния материала стержня, в которой деформации от химической усадки входят непосредственно в уравнения связей напряжений и деформаций; г) усилия пултрузии стержня, учитывающей давление связующего и напряженно-деформированное состояние материала;
- определении взаимосвязей между конструктивными, технологическими параметрами оборудования и физико-механическими, теплофизическими,



физико-химическими параметрами композиционного материала, обеспечивающими повышение производительности пултрузионного оборудования и качества осесимметричных длинномерных изделий.

**Достоверность** полученных результатов определяется корректным использованием методов термо- и гидромеханики, химической кинетики, теории упругости, теории прочности композиционных материалов, применением апробированных аналитических и численных методов расчета, а также проведением необходимых экспериментов и испытаний. Стеклопластиковые стержни и трубы, изготовленные безфильтрным методом и пултрузией, выпускаются в больших объемах и применяются в различных сферах народного хозяйства.

#### **Реализация результатов работы**

Результаты работы используются на предприятиях ООО «Машспецстрой» (г. Пермь), ООО «Полимерпром» (г. Нижний Новгород) и ООО «Нанотехнологический Центр Композитов» (г. Москва).

**Личный вклад автора** в настоящую работу состоит в разработке математической модели процесса пултрузии и ее разновидностей, теоретических исследований на основе разработанной модели, проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных, в выполнении компьютерного моделирования и расчетов, а также анализе и обобщении полученных результатов.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, входящих в систему цитирования Web of science и Scopus. Получено 3 патента.

#### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались на Всероссийской молодежной научной конференции «Автоматизация и информационные технологии» (Москва, 2012г.), Международной научной конференции «Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы» (Санкт-Петербург, 2012, 2013 и 2015 гг.),

Международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (Ульяновск, 2012), Третьей Всероссийской научно-практической конференции «Принципы и механизмы формирования национальной инновационной системы Российской Федерации» (Дубна, 2012).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы (128 наименований). Работа изложена на 186 страницах, содержит 77 рисунков, 16 таблиц и 4 приложения.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования, изложено содержание диссертационной работы.

**В первой главе** рассмотрены свойства и особенности композитных изделий, получаемых пултрузией. Раскрыты преимущества пултрузии перед другими способами формования изделий из полимерных композиционных материалов. Приведено описание процесса пултрузии и ее разновидности (нидлтрузии). Приведен подробный анализ отечественной и зарубежной литературы по моделированию пултрузионного процесса.

**Во второй главе** представлены характеристики используемых материалов и методов исследований. При создании пултрузионных стержней диаметром 16, 76 и 80 мм и трубы с внешним и внутренним диаметром 32 и 24 мм соответственно применялось связующее №1 на основе немодифицированной эпоксидной смолы EPOTEC YDL 680 (на основе бисфенола-А), ангидридного отвердителя EPOTEC TH 7652 и жидкого ускорителя (третичный амин) EPOTEC TA 7851 (состав смеси 100:100:1). Для определения параметров кинетики отверждения связующего были проведены лабораторные исследования на приборе NETZSCH DSC 204 Phoenix в интервале температур 40-250 °С в динамической атмосфере аргона со скоростями 5, 10 и 15 К/мин. Для исследования вязкости связующего при отверждении применялся вискозиметр Брукфильда CAP2000+H с рабочим узлом конус-

плоскость. В качестве наполнителя в процессе производства использовался стеклоровинг ЕС-24-4800-350, при этом объемное содержание волокна в композите составляло 0.6.

Математическое моделирование по определению температуры, степени отверждения, напряженного состояния композиционного материала проводилось внутри фильеры длиной 1 м, а также для участка длиной 1 м после выхода изделия из фильеры.

В производстве композитной арматуры применялось связующее №2 на основе немодифицированной эпоксидной смолы CYD-128 (на основе бисфенола-А), отвердителя Vestamin IPD (циклоалифатический диамин) и разбавителя Лапроксид-БД (диглицидиловый эфир 1,4-бутандиола). Пропорции смеси 388:100:43 соответственно. Значения параметров кинетики отверждения связующего были предоставлены фирмой ООО «Машспецстрой». Для определения параметров кинетики отверждения связующего использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в динамическом режиме на приборе METTLER TOLEDO с использованием программного обеспечения STAR.

Математическое моделирование по определению температуры, степени отверждения, напряженного состояния композиционного материала для пултрузии проводилось внутри фильеры длиной 1 м, а также для участка длиной 1 м после выхода изделия из фильеры.

Математическое моделирование по определению температуры и степени отверждения композитной арматуры проводилось для участка внутри полимеризационной печи длиной 6 м, оснащенной инфракрасными обогревателями типа FSR 250W. Для измерения температуры внутри стержня в процессе его отверждения использовалась хромель-алюмелевая термопара типа «К» с диапазоном измерения  $-270 + 1372$  °C ( $41 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ).

Для определения степени отверждения с помощью метода ДСК были определены остаточные тепловые эффекты отверждения связующего в образцах композитной арматуры, полученных при различных скоростях протяжки.

Измерения проводились в динамическом режиме на приборе METTLER TOLEDO с использованием программного обеспечения STAR.

Математическое моделирование по определению усилия протяжки проводилось для участка внутри ненагреваемой формующей втулки. Измерения усилия протяжки проводилось с помощью крановых весов KB-100K-1.

**Третья глава посвящена** математическому моделированию процесса пултрузии для осесимметричных стержней и труб. Рассматривалась задача теплопроводности и отверждения связующего для пултрузионного изделия. Предложен численный метод решения задачи теплопроводности и отверждения связующего с учетом различий процесса отверждения стержней малого и большого диаметров (принятие гипотезы о возможной незавершенности процесса отверждения внутри фильеры для стержней большого диаметра).

Поставлена и решена задача определения давления связующего, возникающего при сжатии пучка волокон в конусной части фильеры, для двух типов конструкции преформовочного устройства и входного участка фильеры. Рассматривались задачи определения напряженно-деформированного состояния материала изделия и определения усилия пултрузии.

**В четвертой главе** приводится описание проведенных экспериментов. Показаны результаты экспериментов по измерению температурного поля и степени отверждения связующего внутри стеклопластикового стержня диаметром 8 мм при его вытяжке методом пултрузии. Приведены результаты расчета давления связующего и усилия пултрузии стержня при прохождении материала через формующую втулку.

Показаны результаты лабораторных исследований кинетических и реологических свойств связующего на основе смолы EPOTEC YDL 680, отвердителя EPOTEC TH 7652 и ускорителя EPOTEC TA 7851 (состав смеси 100:100:1). Полученные данные использовались в математической модели по прогнозированию пултрузионной вытяжки стержней и труб. Приведен пример математического моделирования напряженно-деформированного состояния материала для пултрузии стержня диаметром 16 мм и трубы с внешним

диаметром 32 мм. Приведен пример математического моделирования пултрузии стержня из стеклопластика диаметром 76 мм.

**В пятой главе** формулируется постановка задачи математической оптимизации пултрузии и нидлтрузии. Вводятся понятия оптимальности, критерия качества, оптимального решения, управляемых и неуправляемых параметров процессов. Выполнена оптимизация температурно-скоростного режима пултрузии стержня диаметром 16 мм и нидлтрузии стержня диаметром 8 мм. Получено оптимальное соотношение между углом конусности входного участка фильеры, его длиной и радиусом изделия, из которого можно определить оптимальное значение угла или длину конусного участка фильеры при заданных двух других параметрах.

# **1 Технология непрерывного формования осесимметричных изделий методом пултрузии**

## **1.1 Преимущества пултрузии перед другими способами формования изделий из ПКМ**

С давних времен человек использовал идею соединения двух или более компонентов для того, чтобы получить новый материал с другими свойствами. Такими компонентами в современных композиционных материалах являются матрица и наполнитель. Наполнитель служит для передачи основных силовых потоков, а матрица обеспечивает целостность системы и одновременность деформации. Получаемый материал обладает направленным характером свойств, то есть материал обладает высокими характеристиками в одних направлениях, и низкими в других [6]. Так, продольно армированные изделия, получаемые традиционной пултрузионной технологией, обладают хорошей прочностью при продольном растяжении (1400-2200 МПа) и низкой прочностью при кручении и сжатии в поперечном направлении (280-310 МПа) [19]. Такие изделия подвержены образованию трещин, обладают низкой устойчивостью к повреждениям. Для крупногабаритных пултрузионных изделий возникновение магистральной трещины возможно еще на стадии производства [44] из-за воздействия перепада температур и наличия химической усадки связующего. Несмотря на указанные недостатки, процесс пултрузии обладает рядом преимуществ по сравнению с другими традиционными методами формования композиционных материалов – это строгий контроль натяжения и ориентации волокна, уменьшение количества пор и поддержание постоянного содержания наполнителя в композите [48]. Процесс отверждения связующего идет в объеме всего изделия, связывая волокна и матрицу в одно целое, что обеспечивает максимальную прочность на границе раздела матрицы и армирующих волокон.

Пултрузионный профиль используется в качестве заготовки для получения многослойных композиционных изделий, например, намоткой. При этом можно применять различные схемы армирования для разных слоев композита [29, 93].

Таким образом, при правильной отладке процесса, путем изменения состава, структуры, соотношения компонентов и схемы армирования пултрузия позволяет эффективно реализовывать важнейшее достоинство ПКМ – возможность создания изделий и элементов конструкций с заранее заданными свойствами, наиболее соответствующими условиям эксплуатации.

Пултрузия отличается высокой производительностью труда (выше в десятки раз по сравнению с ручным формованием), более высоким качеством выпускаемых изделий, комфортными условиями труда (отсутствие в большом количестве летучих вредных веществ, пыли), снижением загрязнения окружающей среды в сотни раз по сравнению с ручным формованием [15]. В таблице 1.1 для сравнения приведены технико-экономические показатели различных способов изготовления ПКМ [7].

Таблица 1.1 – Оценка различных способов изготовления изделий из ПКМ (в баллах от 1 до 10)

Способ формования	Стоимость оборудования	Производительность	Прочность изделий	Квалификация рабочих	Сложность изделия
Ручная укладка	1	3	3	10	9
Формование под вакуумом	2	2	4	10	9
Формование в автоклаве	3	1	6	6	7
Напыление	4	4	3	10	8
Намотка волокна	6	6	10	2	4
Пултрузия	7	9	9	2	2
Штамповка листовых материалов	10	8	7	4	9
Литье под давлением	10	10	6	2	10
Прессование	9	8	7	4	8

## 1.2 Применение осесимметричных длинномерных пултрузионных изделий

Пултрузионные изделия из ПКМ имеют широкую область применения. Они наилучшим образом подходят для использования в условиях агрессивных сред и больших нагрузок [13]. В строительной индустрии широкое применение находят пултрузионные стержни в качестве арматуры для армирования бетонных конструкций. Композитная арматура представляет собой стержни из арамидных, углеродных, стеклянных, либо базальтовых волокон со специальным наружным слоем, обеспечивающим сцепление стержня с бетоном. Наружный слой обычно выполнен в виде спирального жгута из волокнистого материала (рисунок 1.1). Для увеличения абразивности наружный слой также покрывают пропитанным смолой песком.



Рисунок 1.1 – Стеклопластиковая арматура с внешней оплеткой из базальтовых волокон

Наиболее широкое применение нашли стеклопластиковые стержни. Это обусловлено их экономическими и техническими преимуществами по сравнению с другими ПКМ. Однако в последнее время с ними начали конкурировать базальтопластиковые стержни [49].

Пултрузионные стержни широко применяются в морской добыче нефти и газа. Так, для увеличения осевой прочности пултрузионные стержни из



углепластика применяются в составе глубоководных шлангов. Стержни размещаются вдоль наружного диаметра изнутри составного шланга, удерживаемые на месте выемками, сделанными в экструдированных внутренних пластиковых профилях, которые облицовывают многочисленные стальные трубчатые каналы (рисунок 1.2). Стержни внедряются в составной шланг в процессе производства, как и другие элементы, соблюдая тот же винтообразный угол укладки. Такая конструкция позволяет избежать использования блоков плавучести, которые существенно усложняют установку и значительно увеличивают затраты [22]. Другое применение пултрузионных стержней в морской добыче нефти и газа – их использование в качестве основы для швартов и фалов для центрирования плавучих платформ над буровой скважиной.

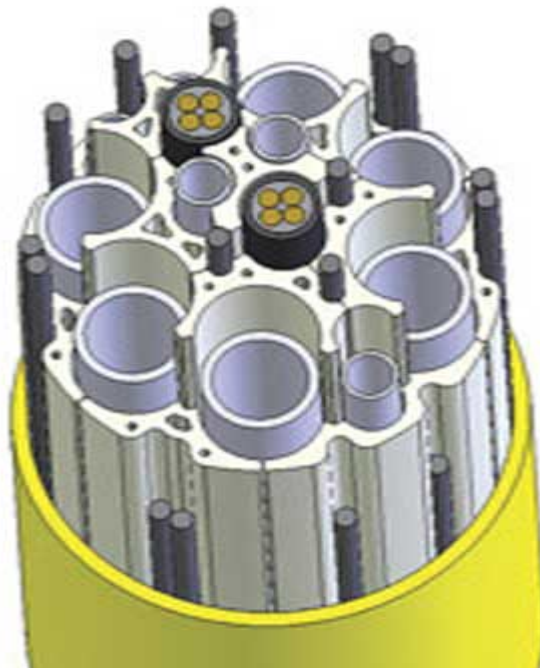


Рисунок 1.2 – Углепластиковые пултрузионные стержни (показаны черным цветом) в составе морского глубоководного кабеля

В России также разрабатываются стеклопластиковые насосные штанги для нефтедобывающей промышленности. Их использование позволяет снизить в 2-3 раза вес колонны штанг, противостоять агрессивным средам, сопутствующим нефтедобыче [49].

Стекло- и углепластиковые пултрузионные стержни диаметром от 1 до 4 мм применяются в качестве армирующих элементов волоконно-оптических кабелей.

Оптические волокна в таких кабелях могут быть либо скручены вокруг несущего стержня, либо располагаться в специальных пазах внутри него [29].

Применение пултрузионных стержней в качестве сердечника в проводящих кабелях (рисунок 1.3 А) способствует значительному увеличению отношения прочности к весу и значительному уменьшению их провисания. Расстояние между опорами становится возможным увеличить вследствие малой величины провисания кабеля, а замена кабеля со стальным сердечником на кабель с композитным сердечником позволяет передавать больше мощности [34].

Композитные кабели успешно заменяют металлические в стоячем такелаже морских и гоночных яхт. Сделанные с использованием углеродных, арамидных или полимерных волокон, они позволяют сохранить от 60 до 75 процентов веса по сравнению со стальным такелажем, который они заменяют, без потери прочности. Наиболее технически трудной задачей является уменьшение концентрации напряжений на концевых фитингах и увеличение связанной с этим их эффективности. Однако существует решение в виде усеченного конуса (рисунок 1.3 Б), которое использует преимущества клиновой механики для увеличения удерживающей нагрузки фитингов.

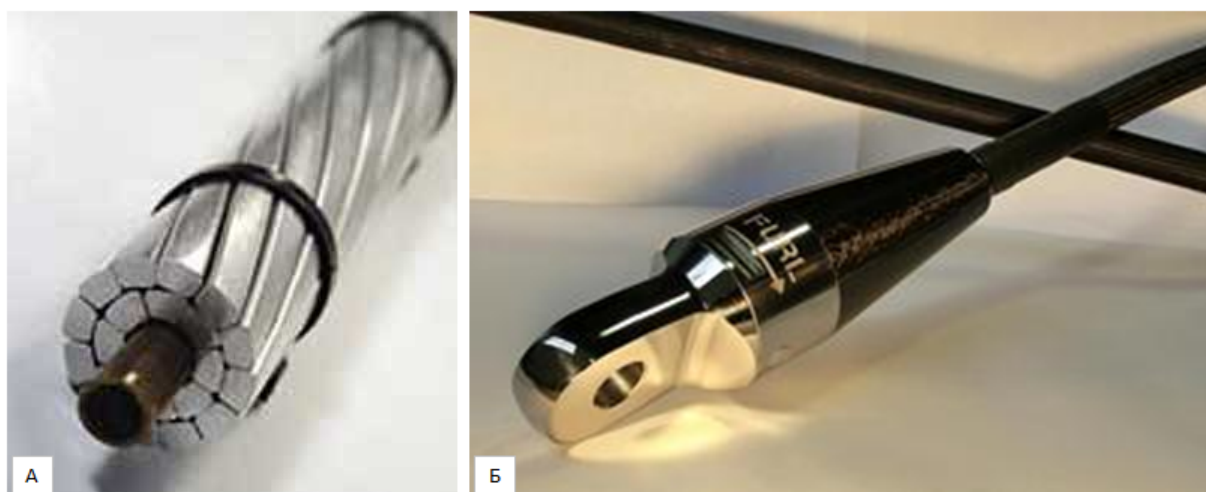


Рисунок 1.3 – Применение пултрузионных стержней в качестве сердечника в проводящих кабелях (А) и в стоячем такелаже яхт (Б)

Композитные стержни находят применение в вантовых мостах. Эти виды мостов поддерживают мостовое полотно посредством серии кабелей, прикрепленных на регулярных интервалах к мостовым фермам и подвешенными

диагонально к точкам крепления на одной или более вертикальных опор (рисунок 1.4). Каждая композитная опора состоит из связки 241 углепластикового провода в эпоксидной матрице, 5 мм в диаметре, сделанных пултрузией. Провода имеют содержание волокна от 65 до 70 процентов, и испытанный модуль растяжения составляет 165 ГПа с прочностью на растяжение 3300 МПа [34].

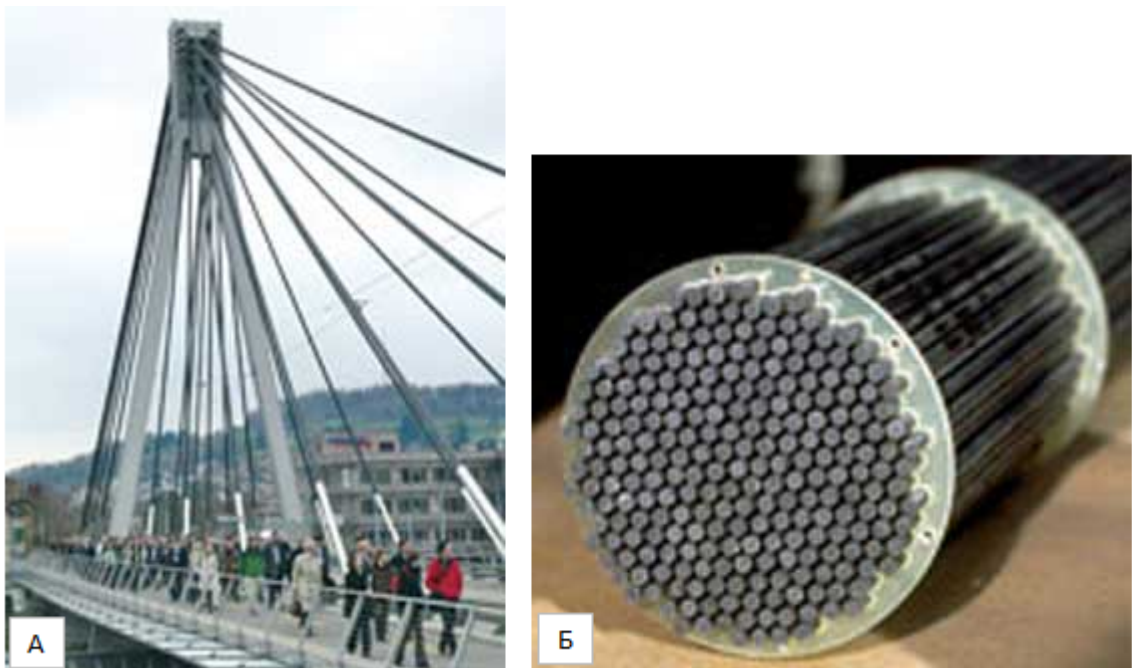


Рисунок 1.4 – Мост Stork в швейцарии (А), две из показанных кабельные опоры выполнены из пултрузионных углепластиковых стержней (Б)

Стеклопластиковые стержни используются для изготовления различных типов полимерных электрических изоляторов: линейных изоляторов высоковольтных ЛЭП; подвесных и натяжных изоляторов контактных сетей железных дорог и городского электротранспорта; опорных изоляторов.

В составе полимерных электрических изоляторов пултрузионные стеклопластиковые стержни выполняют роль основного силового и изолирующего элемента, воспринимающего различные механические нагрузки и воздействие высокого электрического напряжения. Ребристая силиконовая оболочка защищает стержень от воздействия окружающей среды и создает нужную длину пути утечки электрических разрядов (рисунок 1.5). Металлические

оконцеватели, опрессованные на стержень, служат для сопряжения изолятора с арматурой электрических сетей и устройств [35].

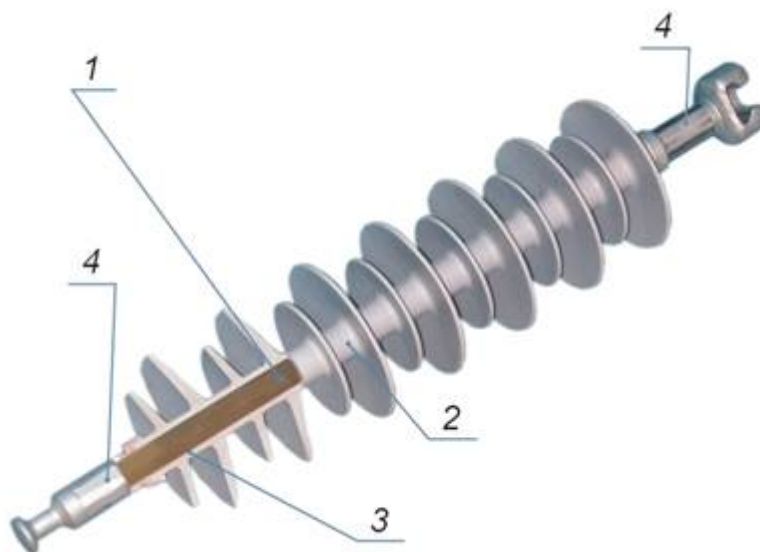


Рисунок 1.5 – Конструкция полимерного изолятора:  
1 – стеклопластиковый стержень; 2 – защитная оболочка; 3 – герметик;  
4 – металлические оконцеватели

Пултрузионные трубы используются в качестве заготовок для получения многослойных изделий [29]. Также с помощью пултрузии изготавливаются стекло- и углепластиковые трубки относительно малых диаметров (до 40 мм) для различных хозяйственных нужд (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Углепластиковые пултрузионные трубки

Пултрузионные стержни находят применение в качестве анкерной крепи для усиления сводов шахт и предотвращения обрушения сегментов породы [3].

Композитная крепь изготавливается из базальтового или стеклянного волокна с добавлением полимерного связующего и имеет длину от 1.8 до 3 метров. Существует несколько видов исполнения. На рисунке 1.7 представлен стеклопластиковый анкер шахтных крепей, существуют варианты изготовления базальтопластиковых анкеров с закрепленной на конце металлической муфты с резьбой (рисунок 1.8). Поверхность стержня имеет песчаное покрытие для усиления сцепления с горной рудой.

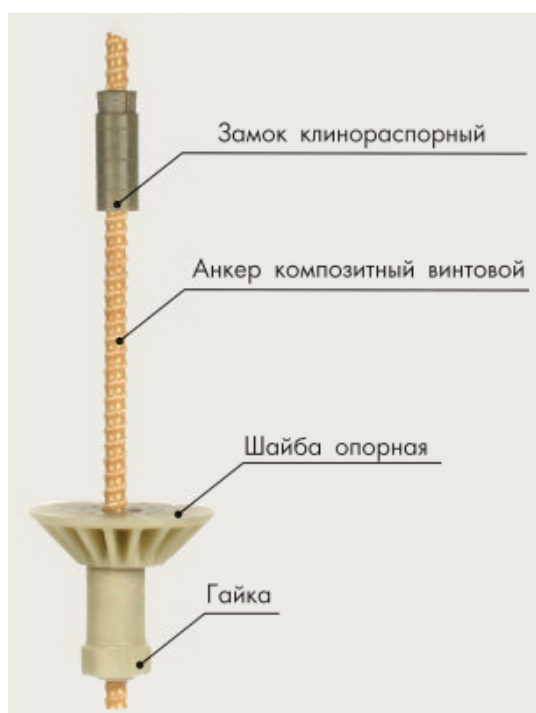


Рисунок 1.7 – Стеклопластиковый анкер шахтных крепей [50]



Рисунок 1.8 – Базальтопластиковый анкер с песчаным покрытием [128]

### 1.3 Описание процесса пултрузии

Среди различных способов изготовления конструкций из композитов необходимо выделить пултрузию как наиболее эффективный метод получения высокопрочных длинномерных композиционных изделий постоянного сечения. Метод заключается в том, что предварительно пропитанные полимерной композицией волокна (стеклянные, углеродные, базальтовые, арамидные) проходят через нагретую фильеру, где происходит формирование будущего изделия и его отверждение, после чего на выходе из фильеры изделие разрезается на элементы заданной длины (рисунок 1.9) [33].

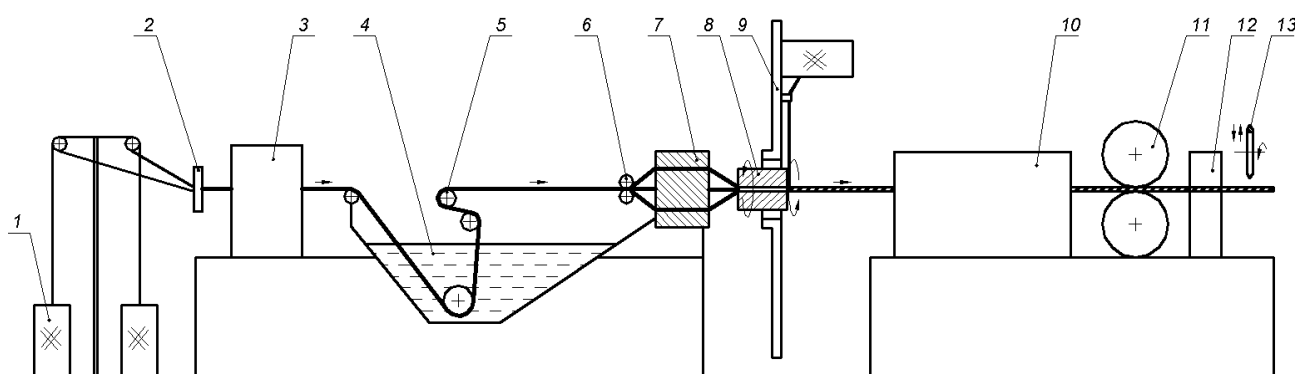


Рисунок 1.9 – Схема процесса пултрузии и ее разновидности - нидлтрузии. В схеме пултрузии устройства 8-9,12 отсутствуют. 1 – Бобины с ровингом, 2 – преформовочная пластина, 3 – камера отжига, 4 – пропиточная ванна, 5 – натяжное устройство, 6 – отжимные валки, 7 – преформовочное устройство, 8 – формирующая втулка, 9 – устройство спиральной намотки, 10 – фильера (пултрузия) или полимеризационная камера (нидлтрузия), 11 – тянущее устройство, 12 – узел сматывания обмоточного жгута (нидлтрузия), 13 – устройство резки.

В типовом процессе изготовления длинномерных изделий методом пултрузии можно выделить шесть основных стадий:

- Размотка армирующего наполнителя с бобин шпулярника [47];
- Подача армирующего материала в пропиточную ванну со связующим и его пропитка;
- Подача пропитанного связующим армирующего материала в преформовочное устройство;
- Протягивание армирующего материала через нагретую формирующую фильеру;

– Отверждение системы волокно/связующее в фильере, в которой материал приобретает форму готового изделия;

– Нарезка изделия на заготовки заданной длины.

Основой для связующего обычно являются эпоксидные смолы, к которым добавляются различные отвердители, ускорители, модификаторы, колеры, пеногасители и прочие добавки. За время пребывания армирующего материала в пропиточной ванне волокна должны полностью пропитаться связующим, чему способствуют отжимные валки, установленные в пропиточной ванне и на выходе из нее (рисунок 1.9, поз. 6). Нередко для улучшения пропитываемости волокон используют ультразвук [2, 40, 52, 53].

Преформовочное устройство (рисунок 1.9, поз. 7) устанавливается после ванны и служит для выравнивания волокна перед его подачей в фильеру.

После преформовочного устройства система волокно/связующее поступает в нагретую фильеру (рисунок 1.9, поз. 10), где в результате экзотермической реакции в связующем происходит полное отверждение композита. На выходе из фильеры получается изделие, поперечное сечение которого повторяет конфигурацию выходного отверстия фильеры. Процесс отверждения композита происходит при непрерывном движении материала внутри фильеры.

На следующем этапе процесса готовое изделие вытягивается из фильеры тянущим устройством (рисунок 1.9, поз. 11), после чего разрезается устройством резки (рисунок 1.9, поз. 13) на элементы заданной длины. Устройство резки в процессе работы перемещается вместе с заготовкой, а после выполнения операции возвращается в исходное положение.

Известен также безфильерный способ изготовления стержней [24], в котором вместо обогреваемой фильеры используется полимеризационная печь (рисунок 1.9, поз. 10). Перед полимеризационной печью устанавливается специальное обмоточное устройство (рисунок 1.9, поз. 9), в составе которого находится формовочная втулка (рисунок 1.9, поз. 8). В ней происходит формирование профиля стержня с удалением избыточного связующего. С помощью устройства обмотки выполняется навивка на поверхность стержня

спирального, перекрестного или продольно-перекрестного рисунка жгута для обеспечения сцепления стержня с бетоном или раствором. В зависимости от рисунка обмотки, на поверхности цилиндрического стержня образуется рельеф различной формы, имеющий вид спиральных (нидлтрузия), ромбовидных (плейнтрузия), или треугольных выступов (дельтатрузия).

Требования, предъявляемые к формующей втулке, значительно ниже предъявляемых к фильере, поскольку формующая втулка не обогревается, в ней не происходит отверждение композиционного материала с его расширением внутри втулки и созданием за счет этого дополнительного высокого давления.

Полимеризационная печь имеет большую длину (6 м), по сравнению с пултрузионной (1 м), и находящийся в ней композиционный материал не соприкасается со стенками печи. Нагрев печи производится специальным нагревательными элементами, тэнами, либо инфракрасными (ИК) излучателями. В первом случае осуществляется прогрев воздуха в печи, во втором случае ИК излучение воздействует непосредственно на поверхность композитного стержня и на стенки печи, вызывая их нагрев.

Пултрузионное оборудование позволяет производить различные длинномерные композиционные материалы, имеющие заранее заданные свойства. С момента покупки пултрузионного оборудования и до получения качественного изделия необходимо пройти большой путь. Перед началом производства нужно определиться с типом связующего и наполнителя, выбрать температурный режим фильеры, скорость пултрузии. Для качественного понимания процесса и его оптимизации необходимо воспользоваться математическим моделированием.

#### **1.4 Математическое моделирование пултрузионного процесса (обзор литературы)**

Математическое моделирование процессов, происходящих при пултрузии, позволяет снизить затраты на отладку производства. Полученные при оптимизации модели результаты могут быть использованы в проектировании технологических устройств, таких как фильера, печь полимеризации, тянущее устройство и др. Для этого необходимо, чтобы математическая модель учитывала



как можно больше различных факторов. Основными физическими процессами в пултрузии являются нагрев и остывание материала, отверждение связующего. Для получения качественного изделия необходимо учитывать давление связующего, обеспечивающее пропитку наполнителя перед подачей в фильеру или полимеризационную печь и нельзя пренебрегать технологическими напряжениями, возникающими в материале из-за влияния температур и химической усадки.

Моделирование пултрузии проводилось с самого начала применения технологии. Самые ранние модели ограничивались определением одномерного температурного поля внутри фильеры для изделий определенной формы и толщины [68, 106, 107]. В процессе своего развития в моделях учитывалось все больше и больше технологических факторов, и кроме определения температуры стало возможным определять не только степень отверждения материала, но и давление связующего в фильере, усилие пултрузии, остаточные напряжения в материале после его выхода из фильеры.

Известные в литературе модели пултрузионного процесса отличаются заложенными в них уравнениями, граничными условиями, способом решения. В настоящее время принято различать в составе общей математической модели пултрузии несколько подблоков, или модулей. К таким относятся:

- модуль расчета теплопроводности и отверждения связующего;
- модуль определения давления связующего;
- модуль определения усилия пултрузии;
- модуль определения напряжений.

Модуль теплопроводности и отверждения связующего является основой, позволяющей получить необходимые входные данные для остальных подмоделей. Например, вязкость является одним из основных параметров для определения давления связующего, а она связана при помощи реологического уравнения с температурой и степенью отверждения. Также температурное поле учитывается при определении остаточных напряжений в материале.

Работы по моделированию процесса теплопроводности и отверждения связующего начались в конце 1970-х годов. Прайс (Price) [106] впервые решил задачу определения температуры в фильере в одномерной постановке, используя изотермическое условие с однородным распределением температуры в фильере без учета теплопроводности. Задача решалась методом конечных разностей (МКР). Прайс не предоставил никаких экспериментальных результатов исследования.

Прайс (Price) и Капшалк (Cupschalk) [107], а также Биббо (Bibbo) и Гутовский (Gutowski) [68] проводили работы по определению усилия пултрузии и установили, что его формируют четыре составляющих: усилие натяжения волокон до входа материала в фильеру, сила вязкого трения, сила от сжатия пучка пропитанных связующим волокон во входной части фильеры, сила сухого трения. Математические модели этих авторов не учитывали уравнения теплопроводности и отверждения связующего, и использовали только один изменяемый параметр – толщину изготавливаемых изделий.

Айлвард (Aylward), продолжая работу Прайса, впервые применил метод конечных элементов (МКЭ) к решению задачи теплопроводности и отверждения связующего для тонкой (2 мм) полосы из углепластика [60]. Он также не предоставил экспериментальных данных.

Двумерную постановку задачи впервые применил Хан (Han) [85]. Он разработал математическую модель пултрузии ненасыщенных полиэфирных и эпоксидных смол, в которой учитывалось не только изменение температурного поля вдоль фильеры, но также степень отверждения связующего. При этом он принимал во внимание теплопроводность материала в направлении, перпендикулярном направлению вытяжки, изменения в плотности и удельной теплоемкости. Хан не предоставил сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

Тулиг (Tulig) [122] предоставил конечно-элементную модель, в которой граничные условия учитывали как получение композитом конвективного тепла от нагревательных элементов фильеры, так и потерю тепла фильеры в окружающий

ее воздух. Он впервые применил механическую кинетическую модель для эпоксидных смол и показал хорошее согласование предсказанного температурного профиля в фильере с полученным экспериментально. В отличие от эмпирической модели, механическая содержит больше характеристических констант и является более сложной. Например, в ней учитывается количественный состав компонентов связующего.

Батч (Batch) и Макоско (Macosko) также применили механическую кинетическую модель для создания модели пултрузии стекло-полиэфирной системы [67]. Используя МКЭ, они определили влияние вязкости связующего, скорости пултрузии и температуры на процесс отверждения материала внутри фильеры. Они также впервые определили давление связующего для осесимметричного стержня, используя в модели закон Дарси для прохождения жидкости через пористую среду. Однако авторы не рассматривали влияние размеров и конструкции преформирующей пластины на давление связующего внутри фильеры. В последующих работах [66] Батч и Макоско установили, что отверждение связующего при повышенном давлении способствует снижению образования микротрещин и заметно улучшает качество изготавливаемых пултрузией изделий.

Волш (Walsh) и Чармши (Charmchi) [125] стали первыми из тех, кто учитывал тонкий слой связующего между композитом и стенкой фильеры. Они использовали граничное условие неприлипания, при котором слой связующего имел линейный профиль скорости.

В 1989, Хендра (Hendra Ng) и Манас-Злоцвер (Manas-Zloczower) изучали влияние наполнителя на реакцию полимеризации в процессе пултрузии [105]. Результаты моделирования показали, что наполнитель выступает в качестве теплоотвода для системы волокно/связующее, уменьшая экзотермический пик реакции в связующем.

В 1991 году Горфала (Gorthala) предоставил двумерную модель в цилиндрических координатах, основанную на гидродинамической теории жидкости [82]. Он предположил, что излишки связующего выходят из фильеры по

каналу, имеющему в поперечном сечении вид кольца и предоставил зависимости давления как функции от скорости пултрузии, вязкости, радиуса преформирующей пластины для круглой, параболической и клиновидной формы продольного сечения входного участка фильеры. Он показал, что клиновидная (линейная) форма обеспечивает более высокое давление связующего по сравнению с остальными. Однако автор не предоставил экспериментальные данные и значения давления на оси симметрии стержня, где оно может быть другим. Вязкость в модели принималась постоянной величиной, которая не зависела от степени отверждения и температуры внутри фильеры.

В 1996 Чачад (Chachad) и др. разработали трехмерную модель пултрузии, позволяющую определять температуру и степень отверждения для изделий сложной формы [120]. Модель позволяла предопределять температурные условия на фильере, что является важным при проектировании этого узла. Решение осуществлялось методом конечных разностей.

Ким (Kim) и др. предоставили модель по определению давления связующего и усилия пултрузии посредством широкого диапазона различных условий и сравнили результаты с экспериментом [90].

Роукс (Roux) и др. [112] показали сравнение результатов трехмерного моделирования пултрузии несимметричного сечения с экспериментом, предоставив детальные данные.

Комму (Kommu), [91] и Мустафа (Mustafa) [104] создали модели для инъекционной пултрузии (Injection Pultrusion, IP). IP-процесс отличается от традиционной пултрузии тем, что пропитка волокон связующим происходит в фильере, куда смола поступает под давлением. Модель Комму применялась для тонких изделий, а модель Мустафы разработана для изделий большой толщины.

Атарсия (Atarsia) и Букхили (Boukhili) [59] изучили влияние скорости пултрузии на размеры зон жидкой фазы и зоны гелизации внутри фильеры. Сведения о расположении таких зон полезны для оптимального управления скоростью вытяжки и температурным режимом фильеры.

В некоторых научных работах основное внимание уделяется химико-реологическим свойствам применяемых смол в рамках решения моделирования кинетики отверждения связующего [57,114].

Проницаемость связующего сквозь волокнистую среду изучали Сангани (Sangani) и Акривос (Acrivos) [113], Гебарт (Gebart) [79], Брюшке (Bruschke) и Адвани (Advani) [69]. Они рассматривали обтекание жидкости вокруг бесконечных цилиндров с помощью моделей квадратичной и гексагональной упаковок волокон. Результатом исследований стали практические формулы по вычислению проницаемости среды в продольном и поперечном направлениях.

Необходимо отметить ряд публикаций отечественных авторов. Большой вклад в развитие теоретических представлений о непрерывных способах производства изделий из композиционных материалов сделали: Бужгулашвили В. А., Жовнер Б. А., Кленин Ю. Г., Ольховик О. Е., Петров А. В., Сафонов А. А., Ставров В. П., Ушаков А. Е., Царев В. Ф. и др.

Анализ публикаций показал следующее. Большинство исследователей проводили численные и экспериментальные исследования по отдельным аспектам, присущих пултрузии, ориентируясь в основном на вопросы, связанные с теплопроводностью и отверждением связующего [64, 65, 70, 71, 76, 86, 96, 102, 125], определением давления [67, 78, 81, 111], определением усилия пултрузии [72, 77, 94, 107, 110, 115, 116, 127]. В некоторых научных работах основное внимание уделялось химико-реологическим свойствам применяемых смол в рамках решения моделирования кинетики отверждения связующего [57, 114], а также усадочным, упругим и тепловым свойствам термореактивных полимеров в процессе их отверждения [36]. Отдельно выделяются работы по описанию процесса возникновения остаточных напряжений и их количественному определению [99, 109]. Также существуют математические модели, в которых сделана попытка объединить все субмодели (в том числе субмодель с определением напряжений с учетом химической усадки) в одну программу [75], однако такие программы решаются методом конечных элементов с привлечением пакетов высокого уровня (ANSYS, ABAQUS), которые сложно использовать по

ряду причин. Кроме того, авторами не приводятся конкретные результаты по определению напряжений и деформаций в крупногабаритных стержнях, получаемых методом пултрузии. Учет напряжений, приводимых в качестве результатов расчета для стержней малых диаметров, не имеют практической значимости ввиду их незначительности.

Также стоит отметить, что моделирование процесса теплопередачи от инфракрасного нагревателя в литературе освещалось, но в большинстве своем оно существовало в виде отдельных исследований [74] или применялось в основном к автоклавному формованию изделий [103]. Применительно к процессу пултрузии (плейнтрузии, дельтатрузии), а особенно касательно оптимизации температурных режимов полимеризационных печей с ИК нагревателями такая литература отсутствует.

В зарубежной литературе метод конечных разностей [66, 85, 120] применяется не часто, в отличие от метода конечных объемов [37] и конечных элементов [60, 61, 86, 90, 91, 96-98, 117, 118]. Зачастую это связано с тем, что для получения достаточной точности решения необходимо увеличивать число дискретных шагов по временному и координатному направлениям, что приводит к увеличению числа уравнений в системе и требует большого расчетного времени. Однако решение методом конечных разностей является простым с математической точки зрения, особенно для одномерных задач [63]. Также, как будет показано в разделе 3.1.3, существуют возможности реализовать в математической модели подход, позволяющий существенно сократить длину программного кода и время расчета.

Крайне мало публикаций посвящено пултрузии крупногабаритных изделий [4, 43]. Между тем, именно при моделировании процесса изготовления толстостенных изделий проявляются такие проблемы пултрузии, как недостаточный прогрев материала, образование различных дефектов, низкая скорость вытяжки. Из-за выделения большого количества тепла при реакции полимеризации термореактивных связующих возможна деструкция материала. Из-за резкого перепада температур и наличия химической и температурной

усадок напряжения и деформации композитного материала при выходе крупногабаритного изделия из фильеры могут превысить предельно допустимые, что приводит к образованию магистральных трещин. Для более полного понимания процесса пултрузии необходимо показать как напряжения, возникающие в стержне, так и поле перемещений точек стержня (для анализа усадки). Этому во всех проанализированных источниках сделано не было.

Применительно к оптимизации процесса пултрузии число работ незначительно [4, 26, 43, 64, 71]. Во всех проанализированных работах проводится оптимизация только температурно-скоростного режима пултрузии без учета связи качества изготавливаемых изделий с величиной давления связующего во входной части фильеры и в большинстве работ – без учета критериев прочности материала. Модель по определению давления связующего при подаче материала через кольцевую раскладочную гребенку отсутствует в литературе вообще, несмотря на практическое применение данной технологии в некоторых производствах.

Таким образом, существующие математические модели пултрузии имеют ограниченные возможности. Поэтому разработка модели процесса непрерывного формования осесимметричных изделий из ПКМ является актуальной задачей для современной промышленности.

## 2 Объекты и методы исследования

### 2.1 Пултрузия стержней и труб

В работе исследовались стеклопластиковые стержни и трубы на основе эпоксидной смолы с объемным содержанием волокна 0.6. Для процесса пултрузии рассматривались стержни диаметром 16, 76 и 80 мм, а также труба с внешним и внутренним диаметром 32 и 24 мм соответственно (рисунок 2.1).



Диаметр	Длина участка	Примечание
Стержень, 16±0.1 мм	1 м	Участок внутри фильеры
Стержень, 76±0.2 мм	1 м	Участок после выхода из фильеры
Стержень, 80±0.2 мм	0.04 м	Входной конусный участок
Труба, внешний 32±0.15 мм, внутренний 24±0.15 мм	1 м	Участок внутри фильеры

Рисунок 2.1 – Рассматриваемые в работе композитные стержни, изготавливаемые пултрузией

Для производства стержней и труб в заводских условиях применялось связующее №1 на основе немодифицированной эпоксидной смолы EPOTEC YDL 680 (на основе бисфенола-А), ангидридного отвердителя EPOTEC TH 7652 и жидкого ускорителя (третичный амин) EPOTEC TA 7851 (состав смеси 100:100:1). Данные компонентов представлены в таблице 2.1. Фирма-производитель: Aditya Birla Chemicals (Тайланд).

Для определения параметров кинетики отверждения связующего были проведены лабораторные исследования на приборе NETZSCH DSC 204 Phoenix в интервале температур 40-250 °С в динамической атмосфере аргона со скоростями 5, 10 и 15 К/мин, для определения кривых вязкости связующего использовался вискозиметр Брукфильда CAP2000+H с рабочим узлом конус-плоскость. Результаты исследования приведены в разделе 4.3.



В таблице 2.2 представлены значения параметров кинетики отверждения связующего №1 для уравнения вида

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n, \quad k_i = A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_{ai}}{R \cdot T}\right), \quad (i = 1, 2) \quad (2.1)$$

Таблица 2.1 – Свойства компонентов связующего №1

Свойство	Спецификация
<b>ЕРОТЕС YDL 680</b>	
Вид	Чистая жидкость
Вязкость при 25 °С, Па·сек	10-15
Удельный вес при 25 °С	1.15
Эпоксидный эквивалент, гр/экв.	184-194
<b>ЕРОТЕС TH 7652</b>	
Вид	Чистая жидкость
Вязкость при 25 °С, Па·сек	80±40
Удельный вес при 25 °С	1.1-1.2
<b>ЕРОТЕС ТА 7851</b>	
Вид	Чистая жидкость
Вязкость при 25 °С, Па·сек	5-15
Удельный вес при 25 °С	0.9-0.95

Таблица 2.2 – Значения параметров кинетики отверждения связующего №1

Параметр	Значение
Теплота отверждения, $H_{tot}$ , Дж/г.	241.13
Энергия активации, $E_{a1}$ , Дж/моль	88300
Частота Аррениуса $A_1$ , $c^{-1}$	$10^{8.54}$
Порядок реакции, $n$	1.2
Энергия активации, $E_{a2}$ , Дж/моль	88300
Частота Аррениуса $A_2$ , $c^{-1}$	$10^{8.752}$
Порядок реакции, $m$	1

В качестве наполнителя использовался стеклоровинг ЕС-24-4800-350, производитель ООО «П-Д Татнефть-Алабуга Стекловолокно», Россия. Свойства представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики стеклоровинга ЕС-24-4800-350

Характеристика	Значение
Диаметр элементарной нити, мкм	24±1.5
Линейная плотность, текс	4800±240
Тип замасливателя	Силановый
Массовая доля веществ, удаляемых при прокаливании, %, не менее	0.5-0.8
Массовая доля влаги, %	<0.2

Математическое моделирование по определению температуры, степени отверждения, напряженного состояния композиционного материала проводилось внутри фильеры длиной 1 м, изготовленной из упрочненной инструментальной стали 38ХНМ (рисунок 2.2 и 2.3), а также для участка длиной 1 м после выхода изделия из фильеры. Для получения трубы методом пултрузии, внутрь фильеры помещали дорн – стальной сердечник, обеспечивающий образование внутренней поверхности трубы. Внешний диаметр дорна равен внутреннему диаметру производимого изделия (24 мм).



Рисунок 2.2 – Внешний вид фильеры

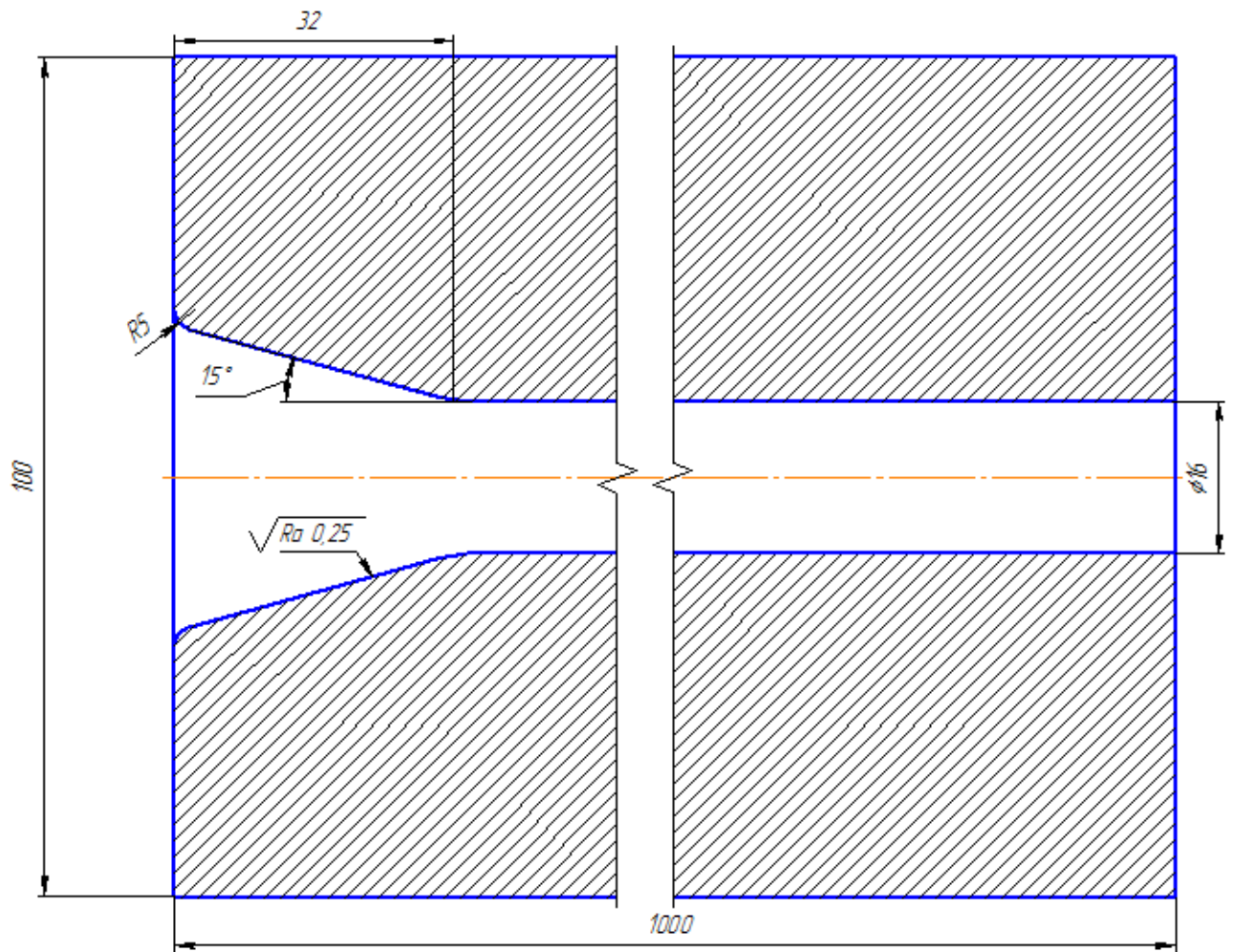


Рисунок 2.3 – Конструкция фильеры (продольный разрез)

Внутренние полости фильеры отполированы до величины шероховатости 0.254-0.762 мкм.

Для измерения диаметра стержня после его выхода из фильеры использовался цифровой штангенциркуль с точностью измерения до 30 мкм.

## 2.2 Безфильерный способ изготовления стержней (нидлтрузия)

В работе исследовались стеклопластиковые стержни диаметром 8 мм на основе эпоксидной смолы с объемным содержанием волокна 0.6 (рисунок 2.3).



Диаметр	Длина участка	Примечание
8±0.3 мм	6 м	Участок внутри печи
	0.06 м	Участок внутри формующей втулки

Рисунок 2.4 – Рассматриваемые в работе композитные стержни, изготавливаемые безфильерным способом

В производстве композитной арматуры применялось связующее №2 на основе немодифицированной эпоксидной смолы CYD-128 (на основе бисфенола-А), отвердителя Vestamin IPD (циклоалифатический диамин) и разбавителя Лапроксид-БД (диглицидиловый эфир 1,4-бутандиола). Пропорции смеси: 388:100:43 соответственно. Данные компонентов представлены в таблице 2.4. Фирма-производитель: CYD-128 – «Sinopec Chemical Commercial Holding Company Limited» (Китай), Vestamin IPD – «Evonik Industries» (Германия), Лапроксид-БД – ООО «НПП «Макромер» им. В.С. Лебедева», Россия.

Значения параметров кинетики отверждения связующего были предоставлены фирмой ООО «Машспецстрой» и приведены в таблице 2.5. Для определения параметров кинетики отверждения связующего использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в динамическом режиме на приборе METTLER TOLEDO с использованием программного обеспечения STAR.

В качестве наполнителя использовался стеклоровинг ЕС-24-4800-350, характеристики которого приведены выше.

Таблица 2.4 – Свойства компонентов связующего №2

Свойство	Спецификация
<b>CYD-128</b>	
Вид	Чистая жидкость
Вязкость при 25 °С, Па·сек	11-14
Гидролизующийся хлор, %	<0.1
Эпоксидный эквивалент, гр/экв.	184-194
<b>Vestamin IPD</b>	
Вид	Чистая жидкость
Вязкость при 23 °С, мПа·сек	18
Эквивалентный вес C <sub>9</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub> , гр/экв.	85.2
<b>Лапроксид-БД</b>	
Вид	Чистая жидкость
Вязкость при 25 °С, мПа·сек	10-30
Массовая доля эпоксидных групп, %	28-34

Таблица 2.5 – Значения параметров кинетики отверждения связующего №2

Параметр	Значение
Теплота отверждения, Н <sub>tot</sub> , Дж/г.	456.44
Энергия активации, E <sub>a1</sub> , Дж/моль	23820
Частота Аррениуса, A <sub>1</sub> , с <sup>-1</sup>	18
Порядок реакции, n	1.9
Энергия активации, E <sub>a2</sub> , Дж/моль	38400
Частота Аррениуса, A <sub>2</sub> , с <sup>-1</sup>	2850
Порядок реакции, m	0.85

Математическое моделирование по определению температуры и степени отверждения композитной арматуры проводилось для участка внутри полимеризационной печи длиной 6 м, оснащенной инфракрасными обогревателями типа FSR 250W. Для измерения температуры внутри стержня в процессе его отверждения использовалась хромель-алюмелевая термопара типа К с диапазоном измерения -270 +1372 °С (41мкВ/°С).

Для определения степени отверждения с помощью метода ДСК были определены остаточные тепловые эффекты отверждения связующего в образцах композитной арматуры, полученных при различных скоростях протяжки.

Измерения проводились в динамическом режиме на приборе METTLER TOLEDO с использованием программного обеспечения STAR. Описание эксперимента приведено в разделе 4.1.

Математическое моделирование по определению усилия протяжки проводилось для участка внутри формующей втулки, конструкция которой показана на рисунке 2.5. Формующая втулка изготавливается из стали марки Ст 45, имеет внутреннюю шероховатость поверхности порядка 0.5-0.7. Измерения усилия протяжки проводилось с помощью крановых весов KB-100К-1 [погрешность измерения 100 гр., производитель «ПетВес», (Россия)]. Результат эксперимента приведен в разделе 4.2.

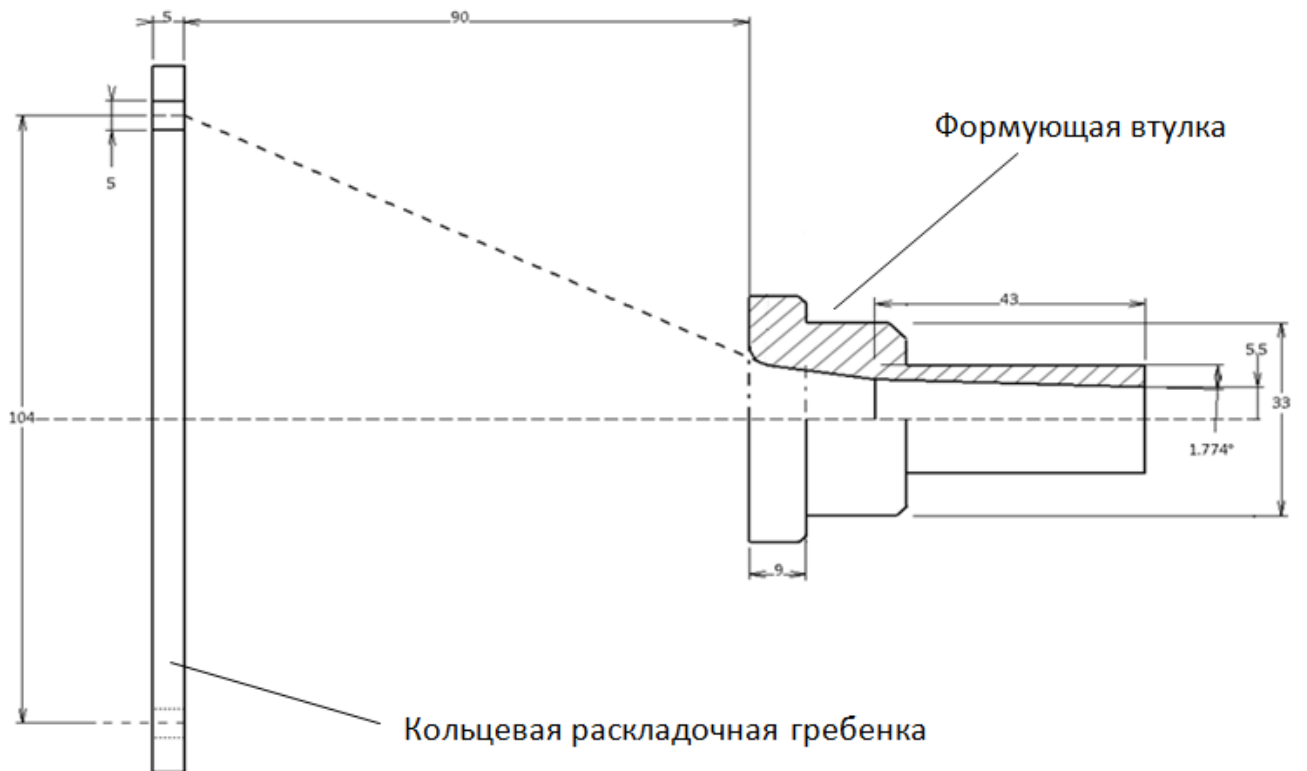
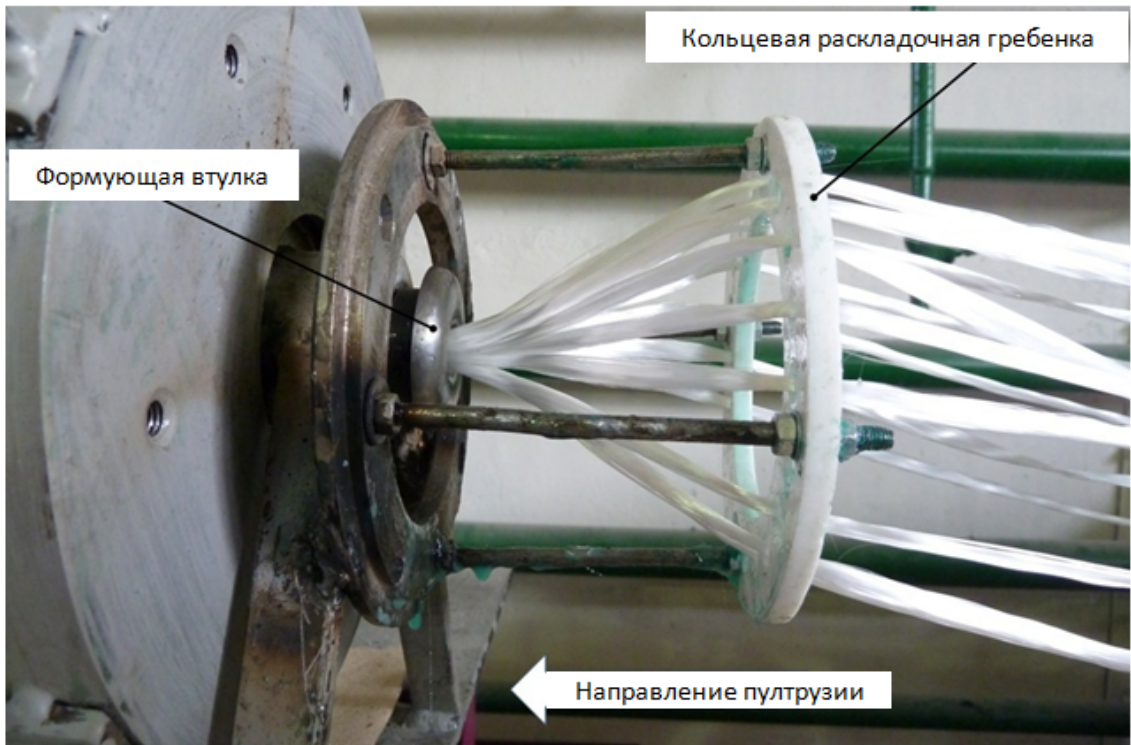


Рисунок 2.5 – Внешний вид и конструкция формующей втулки (экспериментальный образец)

### 3 Математическое моделирование процесса пултрузии для осесимметричных стержней и труб

#### 3.1 Теплопроводность и отверждение связующего

В процессе пултрузии гетерогенная система, состоящая из непрерывного армирующего наполнителя (волокна), и матрицы (смолы) протягивается тянущим устройством в обогреваемую фильеру, которая за счет своей формы придает геометрию поперечного сечения изделию. В фильере происходит нагрев и отверждение связующего, в результате чего на выходе из фильеры получают готовое изделие. При математическом описании процесса нагревания системы волокно/связующее внутри горячей фильеры, а также последующим отверждением связующего не достаточно использовать одно уравнение теплопроводности. В результате реакции полимеризации в термореактивном связующем происходит выделение тепла, влияющее на дальнейшее распределение температуры. Таким образом, необходимо учитывать кинетику отверждения термореактивного связующего, которая соотносит скорость тепловыделения с температурой и степенью отверждения материала.

##### 3.1.1 Уравнение теплопроводности

Пусть система волокно/связующее протягивается через нагретую фильеру с постоянной скоростью  $U$  вдоль оси  $X$  (рисунок 3.1). При этом фильера может иметь как конусный, так и прямолинейный участки.

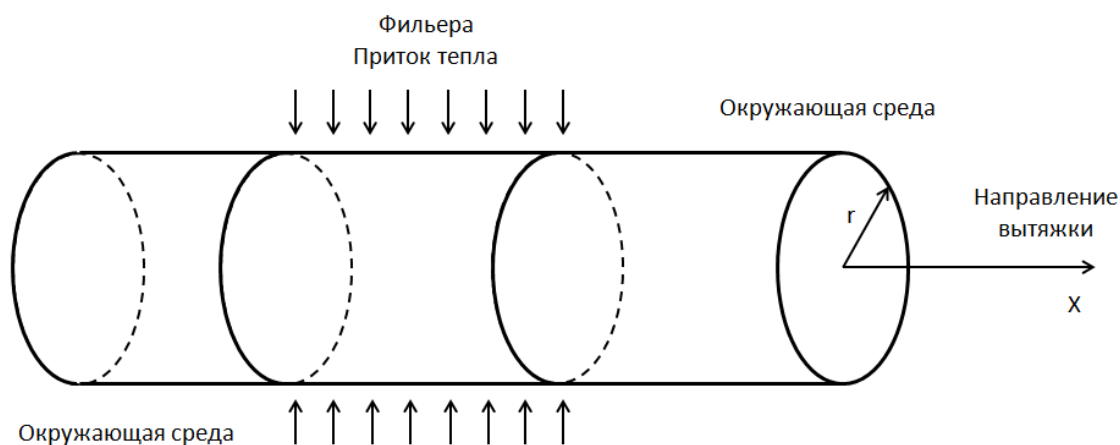


Рисунок 3.1 – К уравнению теплопроводности



На выходе из фильеры готовое изделие охлаждается при температуре окружающей среды. Также фильера может иметь участок с отрицательной или пониженной температурой.

В силу того, что фильера имеет цилиндрическую форму и температура фильеры имеет осесимметричное распределение, то задача является осесимметричной. Таким образом, уравнение теплопроводности для рассматриваемой задачи будет иметь вид [45, 56]:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = \rho_r \cdot H \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \lambda_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (3.1)$$

здесь  $\rho$  – плотность системы,  $\rho_r$  – плотность связующего,  $\alpha$  - степень отверждения,  $H$  - общее тепло, выделяемое при реакции на единицу массы,  $\lambda_r$ ,  $\lambda_x$  - коэффициенты теплопроводности в соответствующих направлениях,  $c$  – удельная изобарная теплоемкость при постоянных деформациях. Через  $x$  обозначена координата вдоль образующей фильеры,  $r$  - координата, изменяющаяся вдоль радиуса.

Производная

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial r} = V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_r \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (3.2)$$

где  $V_r$  - компонента скорости, направленная по радиусу,  $V_x$  - компонента скорости, направленная вдоль образующей. Считая, что коэффициент теплопроводности величина постоянная, а теплопроводность вдоль направления вытяжки отсутствует, (3.1) запишется в виде [17]:

$$\rho \cdot c \cdot \left( V_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + V_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_r \cdot H \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \lambda \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right). \quad (3.3)$$

Поскольку в качестве тела рассматривается система волокно/связующее, то общее тепло, выделяемое при реакции на единицу массы, можно вычислить как

$$H = (1 - v_f) H_{tot} \quad (3.4)$$

Здесь  $v_f$  - объемное содержание волокна, зависящее от продольной координаты.

## Объемное содержание волокна

$$v_f = v_s \frac{R^2}{[R + (L - x) \tan(\varphi_k)]^2}, \quad (3.5)$$

где  $H_{tot}$  - общее количество тепла, которое выделяется за все время реакции отверждения связующего (определяется экспериментально с использованием метода ДСК).  $L$  - длина рассматриваемого участка,  $R$  - радиус готового изделия (радиус прямого участка фильеры),  $\varphi_k$  - угол наклона участка фильеры,  $v_s$  - объемное содержание волокна готового изделия.

Определим компоненты скоростей (рисунок 3.2). Для этого примем гипотезу о равномерном распределении волокон внутри фильеры.

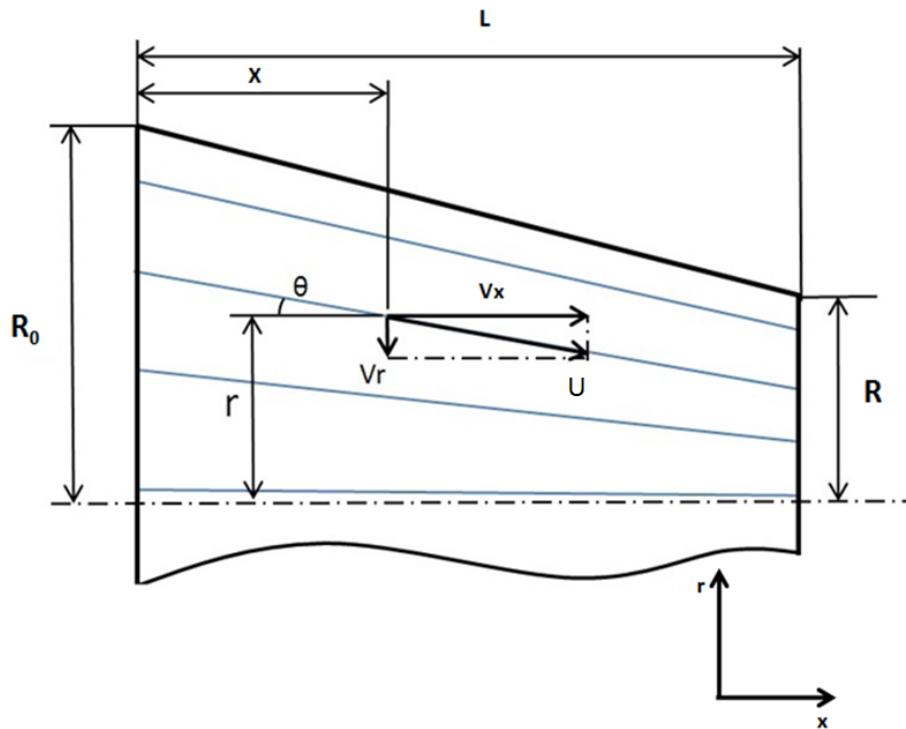


Рисунок 3.2 – Компоненты скорости точки системы волокно/связующее

Выражения для компонент  $V_x$  и  $V_r$  имеют вид:

$$V_x = U \cdot \cos \theta, \quad (3.6)$$

$$V_r = -U \cdot \sin \theta, \quad (3.7)$$

где  $\theta$  – текущий угол наклона волокна к оси  $X$ .

С учетом введенной гипотезы можно получить следующее выражение для тангенса угла  $\theta$ :

$$\tan \theta = \frac{r \cdot \tan \varphi_k}{R_0 - x \cdot \tan \varphi_k}. \quad (3.8)$$

Теперь определим выражения для косинуса и синуса угла  $\theta$ :

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{r \cdot \tan \varphi_k}{R_0 - x \cdot \tan \varphi_k} \right)^2}} = \frac{R_0 - x \cdot \tan \varphi_k}{\sqrt{(R_0 - x \cdot \tan \varphi_k)^2 + r^2 \cdot \tan^2 \varphi_k}}, \quad (3.9)$$

$$\sin \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{r}{R_0 - x \cdot \tan \varphi_k} \right)^2 \tan^2 \varphi_k}} = \frac{r \cdot \tan \varphi_k}{\sqrt{(R_0 - x \cdot \tan \varphi_k)^2 + r^2 \tan^2 \varphi_k}}. \quad (3.10)$$

Тогда выражения для компонент скорости (3.6) и (3.7) примут вид:

$$V_x = \frac{U \cdot (R_0 - x \cdot \tan \varphi_k)}{\sqrt{(R_0 - x \cdot \tan \varphi_k)^2 + r^2 \cdot \tan^2 \varphi_k}}, \quad (3.11)$$

$$V_r = - \frac{U \cdot r \cdot \tan \varphi_k}{\sqrt{(R_0 - x \cdot \tan \varphi_k)^2 + r^2 \tan^2 \varphi_k}}. \quad (3.12)$$

Плотность  $\rho$  системы волокно/связующее определяется следующим образом:

$$\rho = (1 - v_f) \cdot \rho_r + v_f \cdot \rho_f, \quad (3.13)$$

здесь  $\rho_f$  – плотность наполнителя,  $\rho_r$  – плотность связующего:

$$\rho_r = \alpha \cdot \rho_r^c + (1 - \alpha) \cdot \rho_r^u, \quad (3.14)$$

где  $\rho_r^u$ ,  $\rho_r^c$  – плотности неотвержденного и отвержденного связующего соответственно. Аналогичным образом вычисляется удельная изобарная теплоемкость связующего:

$$c_r = \alpha \cdot c_r^c + (1 - \alpha) \cdot c_r^u, \quad (3.15)$$

где  $c_r^u$ ,  $c_r^c$  – удельные изобарные теплоемкости неотвержденного и отвержденного связующего соответственно.

Удельная изобарная теплоемкость материала

$$c = (1 - v_f) \cdot c_r + v_f \cdot c_f, \quad (3.16)$$

где  $c_f$  – удельная изобарная теплоемкость волокна.

Теплопроводность связующего принимается постоянной как для жидкого, так и для твердого состояний. Теплопроводность материала  $\lambda$  определяется из выражения

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1 - v_f}{\lambda_r} + \frac{v_f}{\lambda_f}, \quad (3.17)$$

где  $\lambda_f$  – теплопроводность наполнителя,  $\lambda_r$  – теплопроводность связующего.

Зададим для уравнения (3.3) граничные условия. Принимая за начало отсчета  $x = 0$  на входе в фильеру, можно записать

$$T|_{x=0} = T_0, \quad (3.18)$$

где  $T_0$  – начальная температура массы волокно/связующее.

Вторым граничным условием будет

$$T|_{\substack{0 \leq x \leq L \\ r=R}} = f(x), \quad (3.19)$$

где  $f(x)$  – известная функция температуры на фильере (температурный режим фильеры).

При выходе из фильеры ( $x > L$ ) изделие остывает. Для зоны на выходе из фильеры можно записать граничное условие третьего рода (закон Ньютона-Рихмана) [30]:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\substack{x>L \\ r=R}} = \gamma, \quad (3.20)$$

здесь  $\gamma$  – коэффициент радиационного теплообмена между изделием и окружающей средой.

Коэффициент теплообмена вычисляется согласно закону Стефана-Больцмана [54, 63]:

$$\gamma = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left( T^4 \Big|_{r=R} - T_{\text{сн}}^4 \right), \quad (3.21)$$

где  $\varepsilon_n$  – степень черноты поверхности,  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела ( $5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)),  $T_{\text{вн}}$  – температура окружающей среды.

Наконец, имеет место условие симметрии стержня:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (3.22)$$

Если нагрев стержня осуществляется не в фильере, а в печи (нидлтрузия), граничное условие (3.19) видоизменяется. Если нагрев стержня в печи осуществляется тэнами, вместо условия (3.19) используется следующее:

$$-\lambda \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R}^{0 \leq x \leq L} = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left( T^4 \Big|_{r=R} - T_3^4 \right), \quad (3.23)$$

где  $T_3$  – заданная температура воздуха в печи.

Если нагрев осуществляется ИК излучателями, то поверхность стержня одновременно получает тепло от нагревателя, и сразу отдает часть тепла в окружающий воздух. В таком случае вместо условия (3.19) используется следующее:

$$-\lambda \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R}^{x > L} = \gamma_1 + \gamma_2, \quad (3.24)$$

где коэффициенты теплопередачи определяются по формулам

$$\gamma_1 = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left( T^4 \Big|_{r=R} - T_3^4 \right), \quad \gamma_2 = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left( T^4 \Big|_{r=R} - T_H^4 \right), \quad (3.25)$$

$T_H$  – температура ИК нагревателя.

### 3.1.2 Уравнение кинетики отверждения связующего

Кинетика отверждения термореактивных связующих соотносит скорость тепловыделения с температурой и степенью отверждения и является неотъемлемой частью модели теплопроводности и отверждения связующего.

В процессе отверждения термореактивного связующего олигомерные смолы переходят в высокополимерное состояние, образуя макромолекулы в виде пространственных сеток. Степень отверждения  $\alpha$  определяется отношением количества тепла, которое выделилось в процессе реакции до момента времени  $t$ ,

к общему количеству тепла, которое выделяется за все время реакции отверждения:

$$\alpha = \frac{H_t}{H_{tot}} \quad (3.26)$$

Для полностью неотвержденного связующего  $\alpha = 0$ , для полностью отвержденного  $\alpha = 1$ .

Скорость отверждения принимается пропорциональной скорости тепловыделения:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{H_{tot}} \frac{dH_t}{dt} \quad (3.27)$$

Для каждого типа связующего существует своя скорость отверждения. Известны несколько вариантов моделей кинетики отверждения связующего и их модификации.

Простейшая из моделей имеет вид [108]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1-\alpha)^n, \quad (3.28)$$

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right). \quad (3.29)$$

здесь  $n$  – порядок реакции,  $k$  – константа скорости реакции, является функцией Аррениуса [55] от температуры,  $A$  – предэкспоненциальная константа или частота прохождения Аррениуса,  $E_a$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура.

Модель кинетики отверждения связующего (3.28), (3.29), в том числе первого порядка, широко использовалась многими авторами [43, 106], но она не учитывает автокаталитический эффект и определяет максимальную скорость реакции в начале отверждения связующего.

Для автокаталитического термореактивного связующего применяется следующее уравнение [80, 88]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot \alpha^m \cdot (1-\alpha)^n, \quad (3.30)$$

где  $m$ ,  $n$  – порядки реакции, определяемые экспериментально, коэффициент  $k$  определяется согласно (3.29).

Уравнение (3.30) показывает максимальную скорость реакции в промежуточной стадии конверсии, график зависимости которой от времени представляет собой форму колокола.

Уравнения (3.28) и (3.30) используют одну и ту же константу скорости реакции в течение всего процесса отверждения связующего. На практике несколько событий могут происходить одновременно, что приводит к очень сложной реакции. Поэтому использование нескольких констант скорости обеспечивает более точные результаты моделирования.

Модель Камала [89] включает в себя две константы скорости и успешно применяется для моделирования кинетики отверждения различных смол:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n, \quad (3.31)$$

$$k_i = A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_{ai}}{R \cdot T}\right), \quad (i = 1, 2). \quad (3.32)$$

Одна из модифицированных форм модели Камала имеет вид (модель Кенни) [20, 95, 100]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha^m) \cdot (\alpha_{\max} - \alpha)^n, \quad (3.33)$$

где  $\alpha_{\max}$  – максимальная степень отверждения при заданной температуре вследствие явления стеклования, наблюдаемого при изотермическом отверждении. Таким образом, степень превращения не будет превышать степень отверждения, связанной со стеклованием при определенной температуре. Мишауд [101] обнаружил, что использование  $\alpha_{\max}$  значительно улучшило согласованность автокаталитической модели.

Одной из целей настоящей работы является создание полноценной программы по моделированию процессов, происходящих в фильере и в композитном стержне после выхода из фильеры. Поэтому в работе будет рассматриваться модель (3.33), позволяющая в частных случаях переходить к модели (3.28), (3.30) или (3.31). Для определения параметров кинетики

отверждения связующего используется метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), а для обработки результатов ДСК используется специальная программа, поставляемая с прибором.

При входе в фильеру степень отверждения связующего принимается равной нулю (связующее поступает в фильеру полностью неотвержденным).

Это условие является граничным для уравнений (3.31), (3.32) и имеет вид:

$$\alpha|_{x=0} = 0. \quad (3.34)$$

Таким образом, уравнение теплопроводности (3.3), уравнения моделирования отверждения (3.31), (3.32), граничные условия (3.18) –(3.25) и (3.34) позволяют найти распределение температуры и степень отверждения материала с учетом выделения тепла при отверждении связующего.

### 3.1.3 Решение задачи теплопроводности и отверждения связующего численным методом

Для решения задачи применен быстрый и эффективный метод конечных разностей, основанный на замене производных разностными схемами [42]. Решение задачи рассматривается как для области внутри фильеры, так и после выхода изделия из нее. В общем случае внутренняя полость фильеры может быть выполнена в виде конуса с начальным радиусом  $R_0 > R$ .

Имеем следующие уравнения:

$$\rho \cdot c \cdot \left( V_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + V_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_r \cdot H \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \lambda \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \quad (3.35)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha^m) \cdot (\alpha_{\max} - \alpha)^n, \quad (3.36)$$

$$k_i = A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_{ai}}{R \cdot T}\right), \quad (i = 1, 2). \quad (3.37)$$

Граничные условия:

$$T|_{x=0} = T_0, \quad (3.38)$$



$$T \Big|_{\substack{0 \leq x \leq L \\ r=R}} = f(x), \quad (3.39)$$

$$\alpha \Big|_{x=0} = 0, \quad (3.40)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\substack{x>L \\ r=R}} = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left( T^4 \Big|_{r=R} - T_{\text{вн}}^4 \right), \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (3.42)$$

Представим производную из (3.36) в виде

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial t} \frac{\partial \alpha}{\partial r} = V_x \frac{\partial \alpha}{\partial x} + V_r \frac{\partial \alpha}{\partial r}. \quad (3.43)$$

Для решения поставленной задачи используются неявная разностная схема и четырехточечный шаблон (рисунок 3.3).

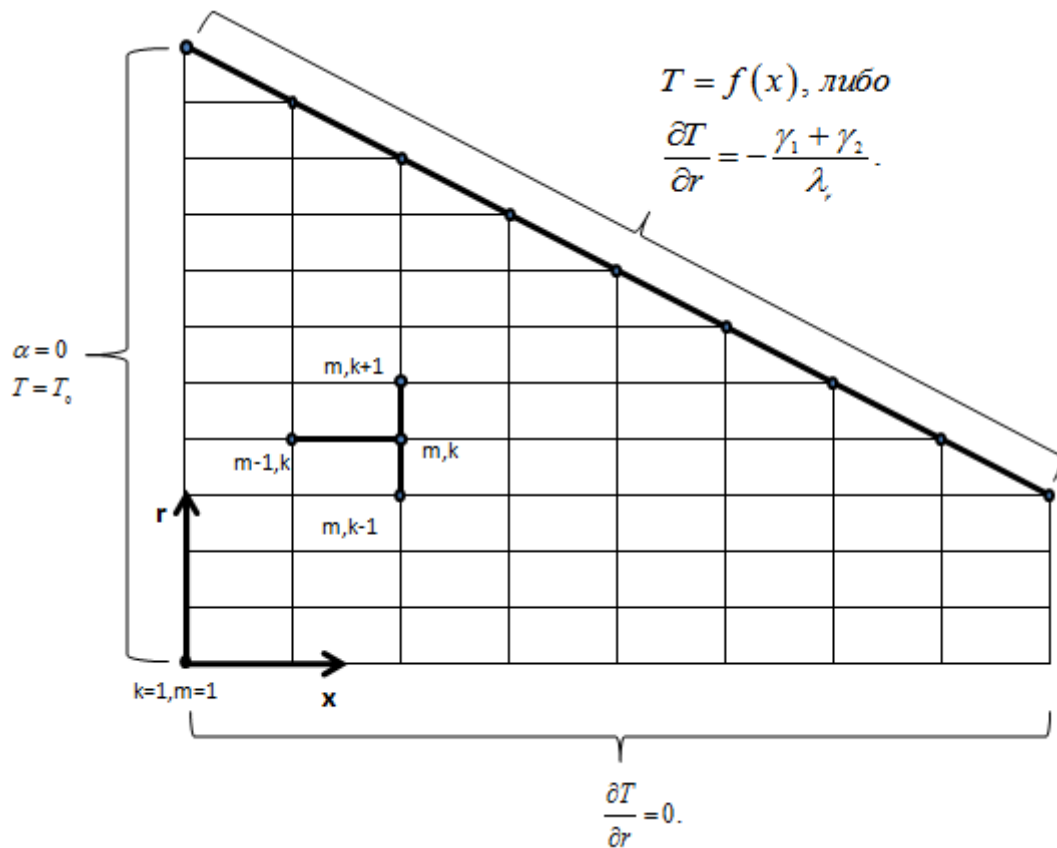


Рисунок 3.3 – Разностная схема, используемая для решения задачи теплопроводности и отверждения связующего

Представим производные в виде разностных аналогов:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{T_{k,m} - T_{k,m-1}}{h}, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{k+1,m} - T_{k,m}}{\tau}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{k+1,m} - 2T_{k,m} + T_{k-1,m}}{\tau^2}, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial x} &= \frac{\alpha_{k,m} - \alpha_{k,m-1}}{h}, \quad \frac{\partial \alpha}{\partial r} = \frac{\alpha_{k+1,m} - \alpha_{k,m}}{\tau},\end{aligned}\quad (3.44)$$

где  $k$  меняется по радиусу изделия от 1 до  $S(x)$  (количество точек на радиусе зависит от координаты  $x$ , если фильера коническая),  $m$  меняется по продольной оси  $OX$  стержня от 0 до  $M$ ,  $\tau$  – шаг сетки по радиусу,  $h$  – шаг сетки по продольной оси.

Уравнения (3.35)-(3.37) с учетом (3.43) примут вид:

$$\begin{aligned}&\rho \cdot c \cdot \left( v_x \cdot \frac{T_{k,m} - T_{k,m-1}}{h} + v_r \cdot \frac{T_{k+1,m} - T_{k,m}}{\tau} \right) = \\ &= \rho_r \cdot (1 - v_f) \cdot H_{tot} \cdot \left( V_x \cdot \frac{\alpha_{k,m} - \alpha_{k,m-1}}{h} + V_r \cdot \frac{\alpha_{k+1,m} - \alpha_{k,m}}{\tau} \right) + \\ &+ \lambda \cdot \left( \frac{1}{(k-1) \cdot \tau} \cdot \frac{T_{k+1,m} - T_{k,m}}{\tau} + \frac{T_{k+1,m} - 2T_{k,m} + T_{k-1,m}}{\tau^2} \right),\end{aligned}\quad (3.45)$$

$$V_x \cdot \frac{\alpha_{k,m} - \alpha_{k,m-1}}{h} + V_r \cdot \frac{\alpha_{k+1,m} - \alpha_{k,m}}{\tau} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha_{k,m-1}^m) \cdot (\alpha_{\max} - \alpha_{k,m-1})^n, \quad (3.46)$$

$$k_i = A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_{ai}}{R \cdot T_{k,m-1}}\right), \quad (i=1,2). \quad (3.47)$$

Граничные условия:

$$T|_{m=1} = T_0, \quad (3.48)$$

$$T|_{\substack{0 \leq (m-1)h \leq L \\ k=S}} = f((m-1)h), \quad (3.49)$$

$$\alpha|_{m=1} = 0, \quad (3.50)$$

$$-\lambda \cdot \frac{T_{S,m} - T_{S-1,m}}{\tau} \Big|_{(m-1)h > L} = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot (T_{S,m}^4 - T_{\text{вн}}^4), \quad (3.51)$$

$$T_{2,m} = T_{1,m}, \quad (3.52)$$

где  $S = S((m-1)h)$ .

Для выражения (3.45) плотность связующего вычисляется по формуле:

$$\rho_r = \alpha_{k,m-1} \cdot \rho_r^c + (1 - \alpha_{k,m-1}) \cdot \rho_r^u, \quad (3.53)$$

а плотность материала

$$\rho = (1 - v_f) \cdot \rho_r + v_f \cdot \rho_f, \quad (3.54)$$

где

$$v_f = v_s \frac{R^2}{\left[ R + (L - (m-1)h) \tan(\varphi_k) \right]^2}. \quad (3.55)$$

Для выражения (3.45) удельная теплоемкость материала вычисляется согласно (3.16), а удельная теплоемкость связующего

$$c_r = \alpha_{k,m-1} \cdot c_r^c + (1 - \alpha_{k,m-1}) \cdot c_r^u. \quad (3.56)$$

Выражения для компонент скорости, записанные в конечных разностях:

$$V_x = U \cdot \frac{R_0 - (m-1)h \cdot \tan \varphi_k}{\sqrt{\left( R_0 - (m-1)h \cdot \tan \varphi_k \right)^2 + (k-1)^2 \tau^2 \cdot \tan^2 \varphi_k}}, \quad (3.57)$$

$$V_r = -U \cdot \frac{(k-1)\tau \cdot \tan \varphi_k}{\sqrt{\left( R_0 - (m-1)h \cdot \tan \varphi_k \right)^2 + (k-1)^2 \tau^2 \tan^2 \varphi_k}}. \quad (3.58)$$

Алгоритм решения задачи следующий. Для каждого временного шага, начиная со второго, составляются матрица коэффициентов (размерностью  $S^2(x)$ ) и матрица-столбец свободных членов для уравнения (3.45), решается матричное уравнение и определяются неизвестные температуры с учетом значений температур и степени отверждения на предыдущем временном шаге и граничных условий. Далее, из решения уравнения (3.46) определяется степень отверждения для текущего временного шага. Цикл повторяется  $M-1$  раз. Такой метод решения, когда матричное уравнение решается на каждом временном шаге, а не сразу для всей области решения задачи, позволил отказаться от метода прогонки [42], сократить длину программного кода и время расчета.

Расчет трубы представляет собой частный случай решения вышеописанной задачи. Для получения трубы методом пултрузии, внутрь фильеры помещают

дорн – стальной сердечник, обеспечивающий образование внутренней поверхности трубы. Внешний диаметр дорна равен внутреннему диаметру производимого изделия. Для конечно-разностных узлов сетки в области дорна задаются характеристики материала (плотность, теплоемкость, теплопроводность), соответствующие материалу, из которого изготовлен дорн (сталь). При этом  $H_{tot} = 0$ . Таким образом, в модели теплопроводности и отверждения в полной мере учитываются все факторы, которые имеют место при производстве осесимметричных изделий методом пултрузии.

### **3.2 Определение давления связующего**

Среди различных подходов к улучшению качества композитных стержней одним из наиболее важных является повышение давления связующего во входном участке фильеры. Повышение давления способствует улучшению пропитки волокон связующим и уменьшает пористость готовых изделий. Конструктивные параметры входного участка фильеры должны обеспечивать максимальное давление в фильере для получения изделий высокого качества. Для определения давления связующего внутри фильеры была разработана специальная математическая модель, основанная на использовании закона Дарси для жидкости, проходящей через пористую среду [31]. В качестве пористой среды выступают волокна, а в качестве жидкости – связующее. Постановка задачи и ее решение были выполнены для двух типов конструкции преформовочного устройства и входного участка фильеры.

#### **3.2.1 Определение давления связующего в фильере**

В этой постановке задачи предполагается, что пропитанные связующим волокна поступают в нагреваемую фильеру равномерным пучком, при этом нити ровинга, пропитанные связующим, ориентируются по направлению вытяжки при помощи специальной преформовочной пластины (рисунок 3.4).

В некоторых работах, в частности, [81], было показано, что наибольшее давление связующего создает линейный профиль конического участка фильеры,

поэтому в настоящей работе рассматривается именно такой профиль как наиболее оптимальный.

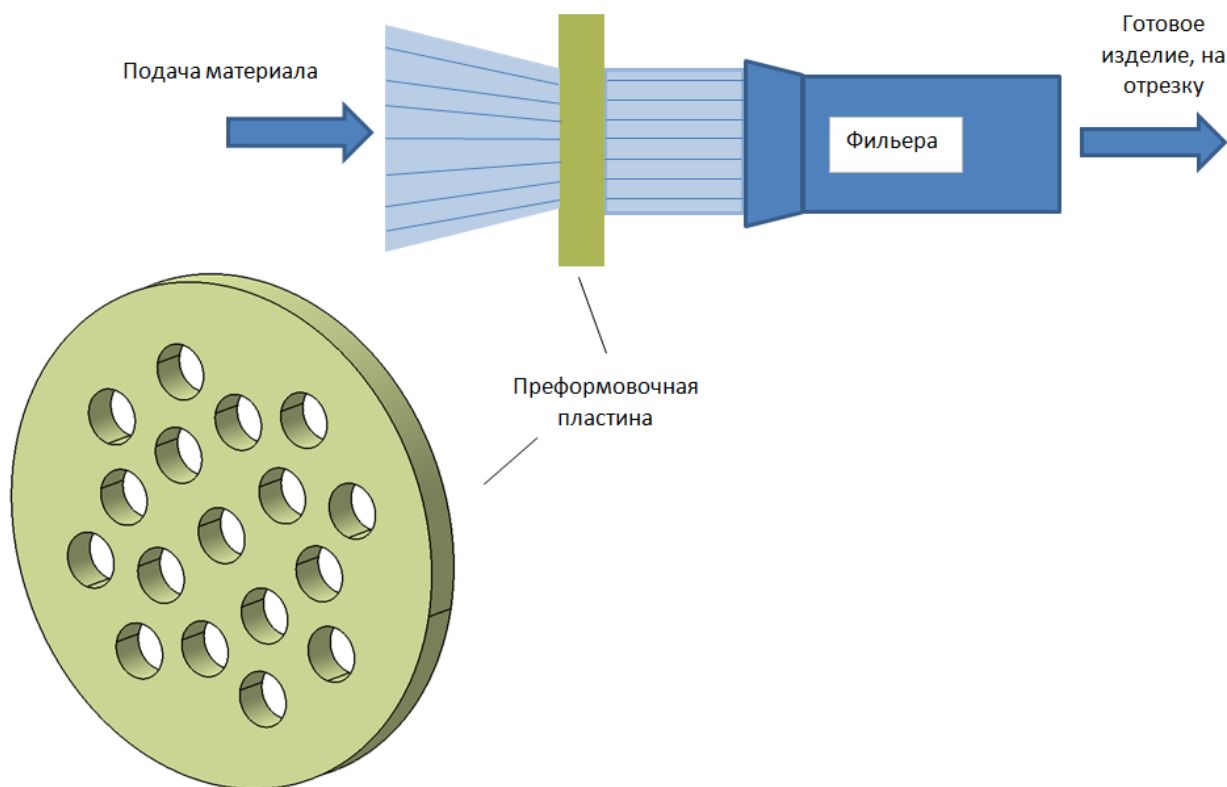


Рисунок 3.4 – Преформовочная пластина, устанавливаемая перед фильерой для получения равномерного пучка волокон (схематичный вид)

Запишем для связующего уравнение несжимаемости [27, 78, 111] в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\phi \cdot u_x) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \cdot \phi \cdot u_r) = 0, \quad (3.59)$$

где  $u_x$ ,  $u_r$  – компоненты скорости смолы в осевом и радиальном направлениях,  $\phi = 1 - v_f$  – пористость среды,  $v_f$  – функция изменения объемного содержания волокна по длине сужающейся части фильеры (3.5).

В проекциях векторов скорости на ось  $x$  (ось  $x$  направлена вдоль оси стержня)

$$u_x = V_x - \frac{K_{11}}{\mu \cdot \phi} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (3.60)$$

В проекциях векторов скорости на ось  $r$  (в радиальном направлении)

$$u_r = V_r - \frac{K_{22}}{\mu \cdot \phi} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}. \quad (3.61)$$

В уравнениях (3.60) и (3.61)  $K_{11}$  – проницаемость среды в осевом направлении,  $K_{22}$  – проницаемость среды в радиальном направлении,  $V_x$  – компонента скорости волокна в осевом направлении (3.11),  $V_r$  – компонента скорости волокна в радиальном направлении (3.12),  $\mu$  – вязкость связующего.

Коэффициенты проницаемости среды в осевом и трансверсальном направлениях при гексагональном расположении пучка волокон получены Гебартом [79]:

$$K_{11} = \frac{8 \cdot R_f^2}{53} \cdot \frac{(1 - v_f)^3}{v_f^2}, \quad K_{22} = 0.231 \cdot \left( \sqrt{\frac{0.907}{v_f}} - 1 \right)^{2.5} \cdot R_f^2. \quad (3.62)$$

Здесь  $R_f$  - радиус волокна.

Подставляя (3.60), (3.61) в выражение (3.59), получим следующее дифференциальное уравнение для определения давления:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_{11}}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{K_{22}}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\phi \cdot V_x) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \phi \cdot V_r). \quad (3.63)$$

В работе принято, что вязкость связующего является функцией от температуры и степени отверждения согласно следующему закону [82, 84]:

$$\mu = \mu_\infty \cdot \exp \left( \frac{E_a}{R_g T} + k_\mu \cdot \alpha \right), \quad (3.64)$$

где  $\mu_\infty$ ,  $k_\mu$  и  $E_a$  – экспериментально определяемые параметры,  $R_g = 8.31$  Дж/моль/К – универсальная газовая постоянная. Значения температуры и степени отверждения берутся из решения задачи теплопроводности и отверждения, рассмотренной в разделе 3.3.

После выполнения операций дифференцирования и приведения подобных членов, уравнение (3.63) примет вид:

$$A \frac{\partial P}{\partial x} + K_{11} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + B \frac{\partial P}{\partial r} + K_{22} \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} = C, \quad (3.65)$$

где коэффициенты

$$A = - \left[ \frac{2(2 + \nu_f) \tan \varphi_k}{(1 - \nu_f)(R_0 - x \cdot \tan \varphi_k)} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right] K_{11}, \quad (3.66)$$

$$B = \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial r} \right) K_{22}, \quad (3.67)$$

$$C = - \frac{2\mu \cdot U \cdot \tan \varphi_k}{\sqrt{\left( (R_0 - x \cdot \tan \varphi_k)^2 + r^2 \cdot \tan^2 \varphi_k \right)}}. \quad (3.68)$$

Задача (3.65) решалась методом конечных разностей. Область решения разбивалась на четыре зоны (рисунок 3.5). При этом моделировалась половина фильеры в силу симметрии. Предполагалось, что зона I целиком заполнена связующим (вследствие его выдавливания системой волокно/связующее при контакте со стенками канала фильеры). Для такой зоны проницаемость среды постоянна и равна во всех направлениях, поэтому уравнение (3.65) примет вид:

$$- \left( \frac{4 \tan(\varphi_k)}{[R_0 - x \cdot \tan(\varphi_k)]} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial r} \right) \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} = 0. \quad (3.69)$$

Для зоны II, расположенной ниже и левее точки пересечения,  $\nu_f = \nu_s \cdot R^2 / R_p^2 = const.$ , для нее справедливо выражение

$$- \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} K_{11} \frac{\partial P}{\partial x} + K_{11} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial r} \right) K_{22} \frac{\partial P}{\partial r} + K_{22} \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} = 0, \quad (3.70)$$

Для зоны III применяется уравнение (3.65) в общем виде. Для прямолинейного участка фильеры (зона IV) также справедливо выражение (3.70), однако для этой зоны  $\nu_f = \nu_s = const.$

Рисунок 3.6 показывает граничные условия и пятиточечный конечно-разностный шаблон, используемый для решения задачи. На наклонной прямой граничные условия получены из условия:

$$\tan \alpha = -u_r / u_x. \quad (3.71)$$

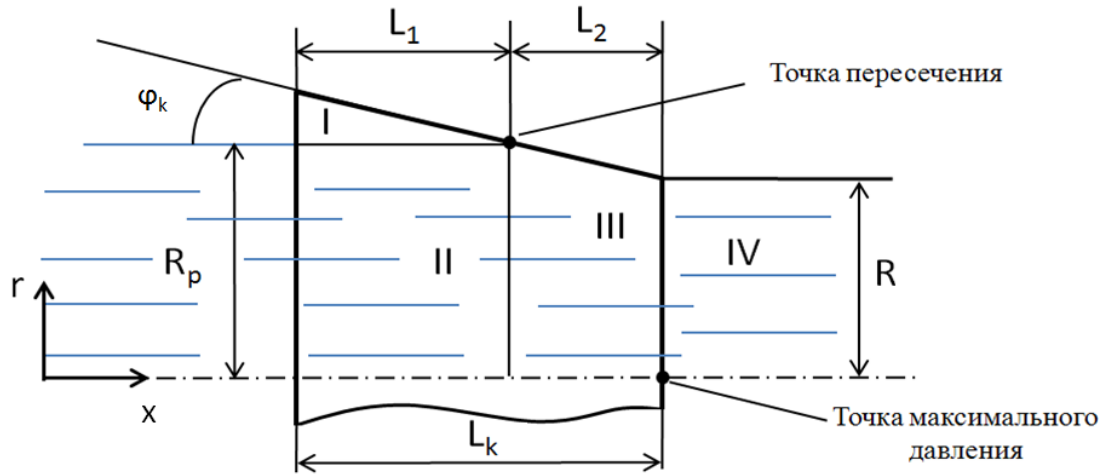


Рисунок 3.5 – Область решения задачи определения давления связующего и геометрические параметры входного участка фильеры

Представляя производные в виде конечно-разностных аналогов, уравнение (3.65) приводится к виду

$$B_{k,m} \frac{K_{11}}{h^2} P_{k,m+1} + A_{k,m} P_{k,m} + \frac{K_{11}}{h^2} P_{k,m-1} + C_{k,m} \frac{K_{22}}{\tau^2} P_{k+1,m} + \frac{K_{22}}{\tau^2} P_{k-1,m} = D_{k,m}, \quad (3.72)$$

где коэффициенты

$$A_{k,m} = \left( \frac{2(2+v_f) \tan(\varphi_k) h}{(1-v_f) [R_0 - (m-1) \cdot h \cdot \tan(\varphi_k)]} + \frac{\mu_{k,m+1} - 3}{\mu_{k,m}} \right) \frac{K_{11}}{h^2} - \left( \frac{3k-2}{k-1} - \frac{\mu_{k+1,m}}{\mu_{k,m}} \right) \frac{K_{22}}{t^2}, \quad (3.73)$$

$$B_{k,m} = 2 - \frac{2(2+v_f) \tan \varphi_k \cdot h}{(1-v_f) [R_0 - (m-1) \cdot h \cdot \tan \varphi_k]} - \frac{\mu_{k,m+1}}{\mu_{k,m}}, \quad (3.74)$$

$$C_{k,m} = \frac{1}{k-1} - \frac{\mu_{k+1,m}}{\mu_{k,m}} + 2, \quad (3.75)$$

$$D_{k,m} = -2U \tan \varphi_k \cdot \mu_{k,m} / \left[ (R_0 - (m-1)h \cdot \tan \varphi_k)^2 + (k-1)^2 \tau^2 \cdot \tan^2 \varphi_k \right]^{0.5}. \quad (3.76)$$

Как было отмечено ранее, степень отверждения и температура для решения задачи берутся с узлов конечно-разностной сетки из решения, полученного при решении задачи теплопроводности и отверждения связующего.



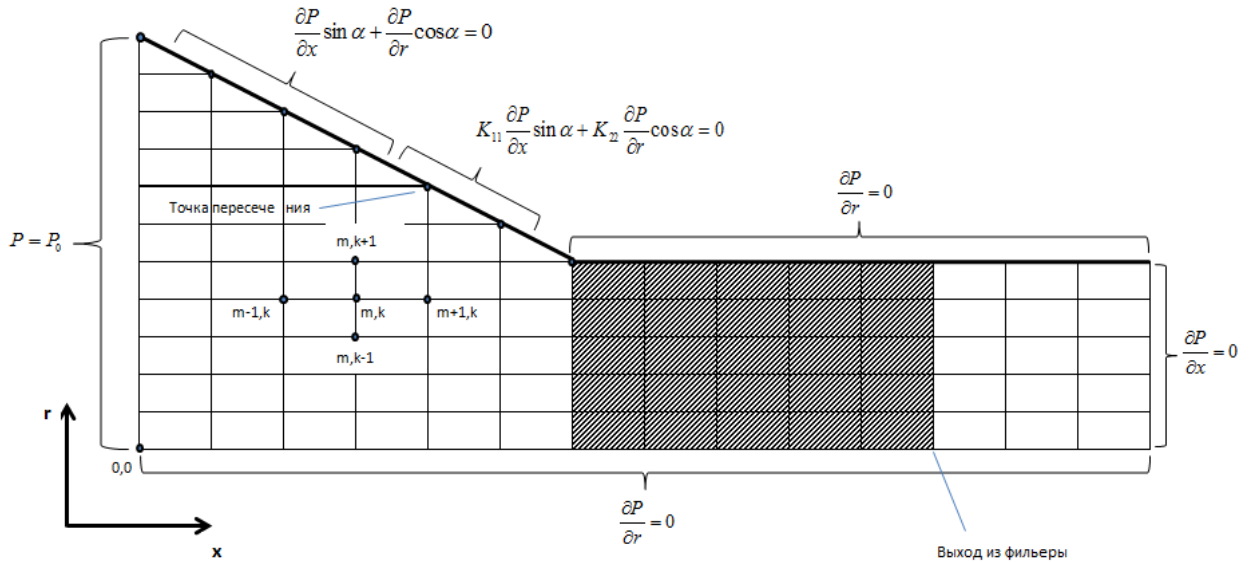


Рисунок 3.6 – Граничные условия для задачи определения давления связующего и конечно-разностная сетка (заштрихованная область – зона прямого участка фильеры)

### 3.2.2 Определение давления связующего в формирующей втулке

В этой постановке задачи предполагается, что пропитанные связующим волокна поступают в формирующую втулку через преформовочную пластину, вид которой представлен на рисунке 3.7. При использовании такой схемы (нидлтрузия, плейнтрузия, дельтатрузия) ровинг входит во втулку по внешнему кольцу толщиной  $t_k$ , а зона I, целиком заполненная связующим, находится у центральной оси стержня (рисунок 3.8). По мере продвижения материала в конусной втулке волокна начинают образовывать кольцо все большей толщины, а радиус зоны связующего уменьшается. Зона III также является конусной. Принимается, что на входе материала в зону III волокна полностью и равномерно распределяются по сечению за счет воздействия возникающего в конце первого конусного участка давления связующего.

Принимая гипотезу о равномерном распределении волокон внутри зоны III, можно определить выражение для тангенса угла  $\theta$ :

$$\tan \theta = \frac{R_I \cdot (R_0 - r) - t_k \cdot (R_I - r)}{(R_I - t_k) \cdot x + t_k \cdot L_k}, \quad (3.77)$$

где  $R_I = R + L_{kII} \cdot \tan \varphi_{kII}$ ,  $R_0 = R + L_{kl} \cdot \tan \varphi_{kl} + L_{kII} \cdot \tan \varphi_{kII}$ .

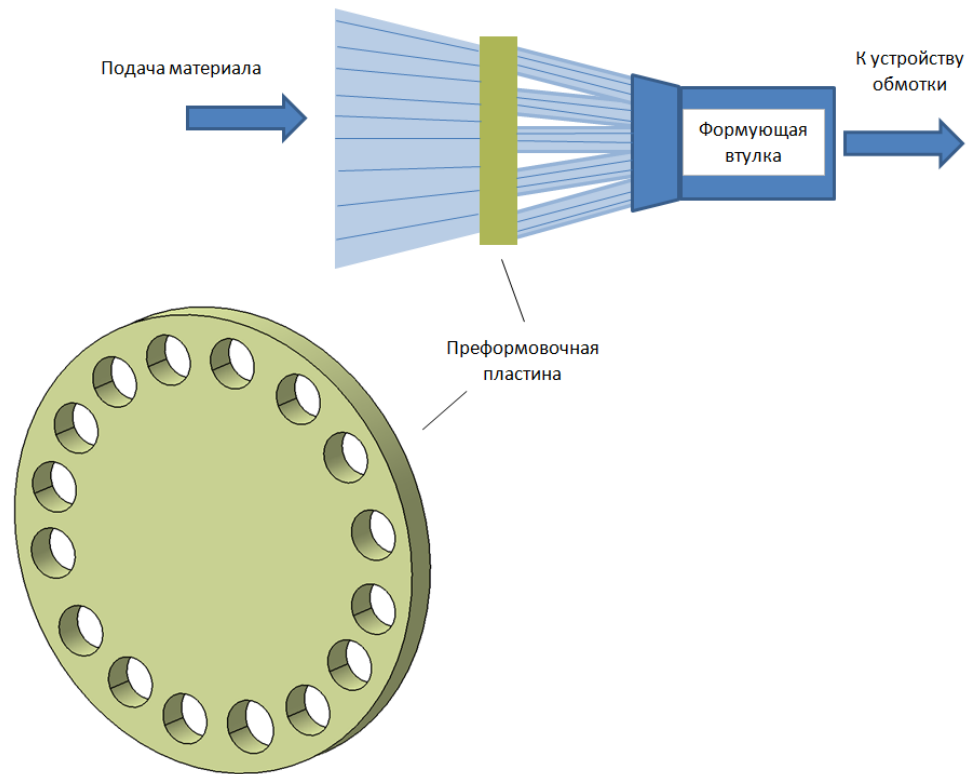


Рисунок 3.7 – Преформовочная пластина второго типа (кольцевая раскладочная гребенка), устанавливаемая перед формирующей втулкой

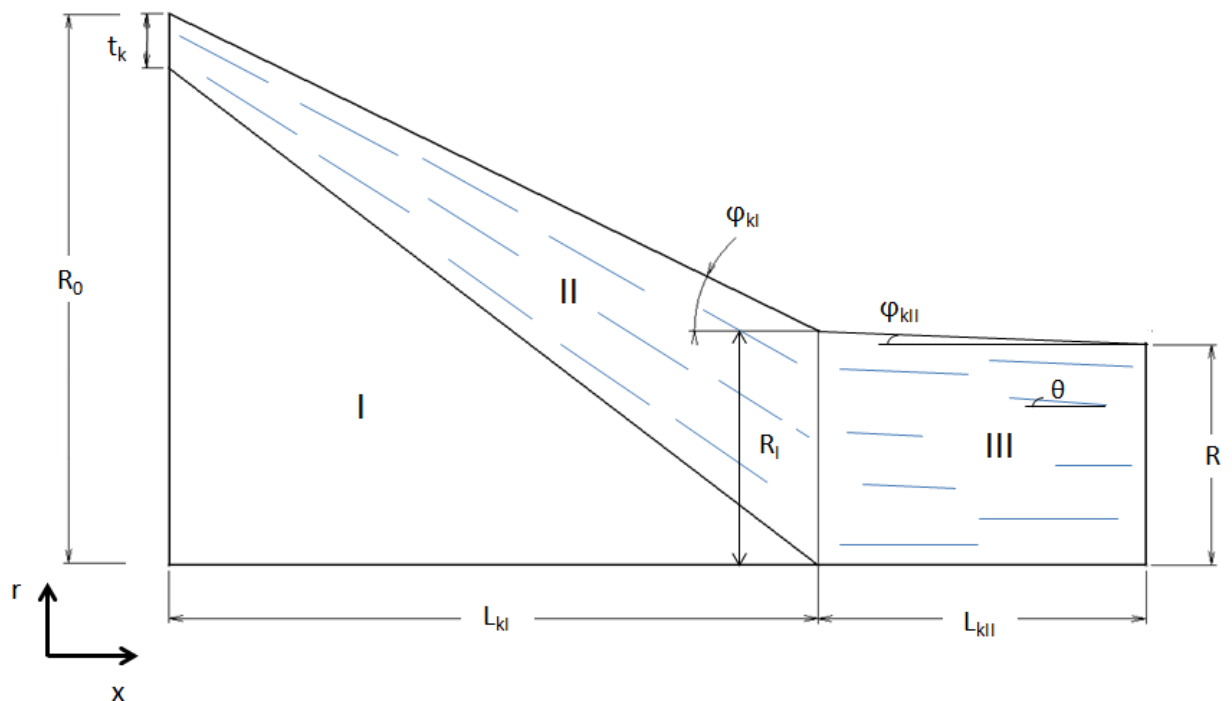


Рисунок 3.8 – Область решения для второй задачи определения давления связующего

Выражения для компонент скорости связующего примут вид:

$$V_x = U \frac{(R_l - t_k) \cdot x + t_k \cdot L_{kl}}{\sqrt{[(R_l - t_k) \cdot x + t_k \cdot L_{kl}]^2 + [R_l \cdot (R_0 - r) - t_k \cdot (R_l - r)]^2}}. \quad (3.78)$$

$$V_r = -U \frac{R_l \cdot (R_0 - r) - t_k \cdot (R_l - r)}{\sqrt{[(R_l - t_k) \cdot x + t_k \cdot L_{kl}]^2 + [R_l \cdot (R_0 - r) - t_k \cdot (R_l - r)]^2}}. \quad (3.79)$$

Площадь, занимаемую волокнами в поперечном сечении, вычисляем по формуле

$$S_f = N \cdot \frac{T}{1000 \cdot \rho_f}, \quad (3.80)$$

где  $N$  – количество нитей ровинга,  $\rho_f$  – плотность волокна [г/м<sup>3</sup>],  $T$  – линейная плотность ровинга [текс].

Для решения задачи подразумеваем, что при продвижении волокон внутри конуса они смещаются от внешнего радиуса к оси стержня, не изменяя в границах зоны II относительного содержания волокна. То есть  $v_f = \text{const}$  для зоны II. Тогда параметр  $t_k$  можно определить как

$$t_k = R_0 - \sqrt{R_0^2 - \frac{S_f \cdot (2 - v_f)}{\pi}}. \quad (3.81)$$

С учетом того, что вязкость постоянна для всех рассматриваемых областей решения задачи, уравнение (3.63) для зоны II приводится к виду:

$$K_{11} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + K_{22} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \right) = \frac{-U \cdot (1 - v_f) \cdot \mu \cdot [R(R_0 - t_k) - 2r(R - t_k)]}{r \sqrt{[(R - t_k)x + t_k L_k]^2 + [R(R_0 - r) - t_k(R - r)]^2}}. \quad (3.82)$$

Основное уравнение для зоны III имеет вид:

$$A \frac{\partial P}{\partial x} + K_{11} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{K_{22}}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + K_{22} \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} = C, \quad (3.83)$$

где коэффициенты

$$A = -\frac{2(2 + v_f) \tan \varphi_{kl}}{(1 - v_f)(R_0 - x \cdot \tan \varphi_{kl})} K_{11}, \quad (3.84)$$

$$C = -\frac{2\mu \cdot U \cdot \tan \varphi_{klI}}{\sqrt{\left((R_0 - x \cdot \tan \varphi_{klI})^2 + r^2 \cdot \tan^2 \varphi_{klI}\right)}}. \quad (3.85)$$

Объемное содержание волокна для зоны II:

$$v_f = \frac{S_f}{\pi \cdot R_I^2}. \quad (3.86)$$

Объемное содержание волокна для зоны III:

$$v_f = \frac{S_f}{\pi \cdot \left[R + (L_{klI} + L_{klII} - x) \tan \varphi_{klI}\right]^2}. \quad (3.87)$$

Для определения  $K_{11}$  и  $K_{22}$  используется выражение (3.62).

Решение задачи аналогично описанному выше для первой задачи.

Граничные условия и конечно-разностная сетка представлены на рисунке 3.9.

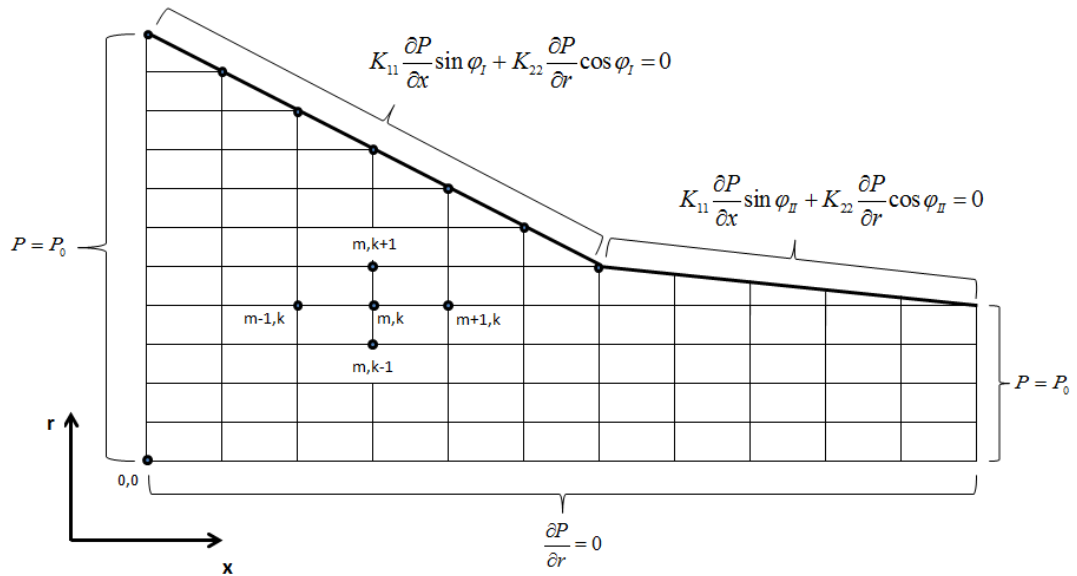


Рисунок 3.9 – Граничные условия для второй задачи определения давления связующего и конечно-разностная сетка

### 3.3 Определение напряженно-деформированного состояния стержня в процессе пултрузии

Ввиду неравномерности прогрева стержня по сечению, и, как следствие, неравномерности степени отверждения при высокой скорости пултрузии внутри фильеры успевают прогреться и отвердиться только поверхностная часть материала (рисунок 3.10). После выхода изделия из фильеры внутренняя часть прогревается за счет температуры поверхностной части. После того, как температура внутри стержня достигнет температуры начала реакции, то здесь также начинается выделение тепла. При высокой скорости вытяжки, если изделие не успевает отвердиться в необходимом объеме, может возникнуть магистральная трещина. Причиной возникновения трещин в изделии является превышение действующих в стержне напряжений над предельно допустимыми значениями. Напряжения в стержне возникают за счет термического расширения (сжатия) материала при воздействии температур, а также наличия химической усадки материала. Таким образом, является важным и актуальным математическое определение напряжений в изделии при его изготовлении.

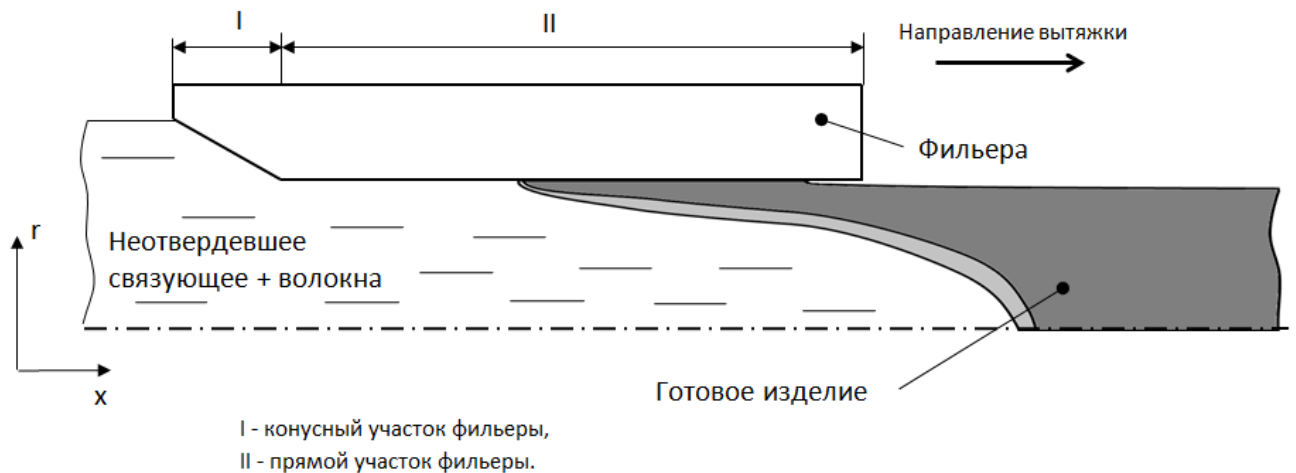


Рисунок 3.10 – Процесс прохождения материала через нагретую фильеру

Рассмотрим поперечное сечение пултрузионного стержня (рисунок 3.11). В общем случае для композитного слоя свойства материала в главных осях 1-2-3 описываются девятью постоянными:  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $\nu_{13}$ . Ось 1 направлена вдоль волокон. Оси 2 и 3 направлены поперек волокон и ортогональны друг другу.

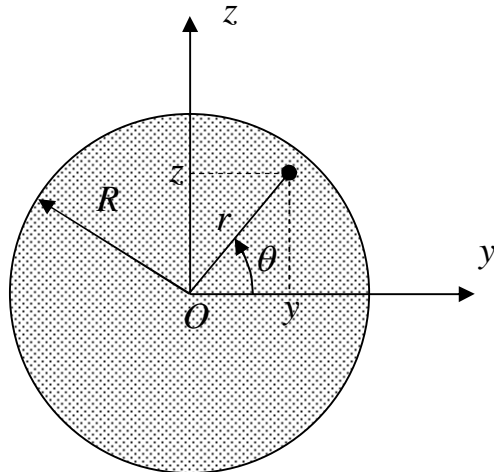


Рисунок 3.11 – Поперечное сечение композитного стержня

Запишем закон Гука для ортотропного материала в главных площадках напряжений [124]:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{12} \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_{13} \frac{\sigma_3}{E_3}, \quad (3.88)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_{21} \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{23} \frac{\sigma_3}{E_3}, \quad (3.89)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_3} - \nu_{31} \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{32} \frac{\sigma_2}{E_2}, \quad (3.90)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}, \quad (3.91)$$

$$\gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G_{13}}, \quad (3.92)$$

$$\gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}}. \quad (3.93)$$

здесь  $E_1 \nu_{12} = E_2 \nu_{21}$ ,  $E_1 \nu_{13} = E_3 \nu_{31}$ ,  $E_2 \nu_{23} = E_3 \nu_{32}$  в силу симметрии упругих постоянных.

Отношения между напряжениями в главных осях 1-2-3 композита и напряжениями в системе координат  $xy$  стержня записываются следующим образом [124]:

$$\sigma_1 = \sigma_x c^2 + \sigma_\theta s^2 + 2\tau_{x\theta} sc, \quad (3.94)$$

$$\sigma_2 = \sigma_x s^2 + \sigma_\theta c^2 - 2\tau_{x\theta} sc, \quad (3.95)$$

$$\sigma_3 = \sigma_r, \quad (3.96)$$

$$\tau_{12} = (\sigma_\theta - \sigma_x)sc + \tau_{x\theta}(c^2 - s^2), \quad (3.97)$$

$$\tau_{13} = \tau_{xr}c + \tau_{\theta r}s, \quad (3.98)$$

$$\tau_{23} = -\tau_{xr}s + \tau_{\theta r}c \quad (3.99)$$

Здесь  $c = \cos \varphi$ ,  $s = \sin \varphi$ ,  $\varphi$  – угол ориентации волокон относительно продольной оси стержня.

Отношения между деформациями в главных осях 1-2-3 композита и деформациями в системе координат  $xr\theta$  стержня представлены в виде [124]:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 c^2 + \varepsilon_2 s^2 - \gamma_{12} sc, \quad (3.100)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_1 s^2 + \varepsilon_2 c^2 + \gamma_{12} sc, \quad (3.101)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_3, \quad (3.102)$$

$$\gamma_{x\theta} = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)sc + \gamma_{12}(c^2 - s^2), \quad (3.103)$$

$$\gamma_{xr} = \gamma_{13}c - \gamma_{23}s, \quad (3.104)$$

$$\gamma_{\theta r} = \gamma_{13}s + \gamma_{23}c. \quad (3.105)$$

Физические соотношения между напряжениями и деформациями в системе координат  $xr\theta$  могут быть найдены путем подстановки (3.94)-(3.99) в уравнения (3.88)-(3.93), а затем в (3.100)-(3.105):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{x\theta}}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu_{xr}}{E_r} \sigma_r + \frac{\eta_{x,x\theta}}{G_{x\theta}} \tau_{x\theta}, \quad (3.106)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\nu_{\theta x}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu_{\theta r}}{E_r} \sigma_r + \frac{\eta_{\theta,x\theta}}{G_{x\theta}} \tau_{x\theta}, \quad (3.107)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{v_{rx}}{E_x}\sigma_x - \frac{v_{r\theta}}{E_\theta}\sigma_\theta + \frac{1}{E_r}\sigma_r + \frac{\eta_{r,x\theta}}{G_{x\theta}}\tau_{x\theta}, \quad (3.108)$$

$$\gamma_{x\theta} = \frac{\eta_{x\theta,x}}{E_x}\sigma_x + \frac{\eta_{x\theta,\theta}}{E_\theta}\sigma_\theta + \frac{\eta_{x\theta,r}}{E_r}\sigma_r + \frac{1}{G_{x\theta}}\tau_{x\theta}, \quad (3.109)$$

$$\gamma_{xr} = \frac{1}{G_{xr}}\tau_{xr} + \frac{\eta_{xr,\theta r}}{G_{\theta r}}\tau_{\theta r}, \quad (3.110)$$

$$\gamma_{\theta r} = \frac{\eta_{\theta r,xr}}{G_{xr}}\tau_{xr} + \frac{1}{G_{\theta r}}\tau_{\theta r}. \quad (3.111)$$

Здесь

$$\frac{1}{E_x} = \frac{c^4}{E_1} + \frac{s^4}{E_2} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2v_{21}}{E_1} \right) s^2 c^2, \quad (3.112)$$

$$\frac{v_{x\theta}}{E_\theta} = \frac{v_{\theta x}}{E_x} = \frac{v_{21}}{E_1} - \left( \frac{1+2v_{21}}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) s^2 c^2, \quad (3.113)$$

$$\frac{v_{xr}}{E_r} = \frac{v_{rx}}{E_x} = \frac{v_{13}c^2 + v_{23}s^2}{E_3}, \quad (3.114)$$

$$\frac{\eta_{x,x\theta}}{G_{x\theta}} = \frac{\eta_{x\theta,x}}{E_x} = 2s c \left[ \frac{c^2}{E_1} - \frac{s^2}{E_2} - \left( \frac{1}{2G_{12}} - \frac{v_{21}}{E_1} \right) (c^2 - s^2) \right], \quad (3.115)$$

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{s^4}{E_1} + \frac{c^4}{E_2} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2v_{21}}{E_1} \right) s^2 c^2, \quad (3.116)$$

$$\frac{v_{\theta r}}{E_r} = \frac{v_{r\theta}}{E_\theta} = \frac{v_{13}s^2 + v_{23}c^2}{E_3}, \quad (3.117)$$

$$\frac{\eta_{\theta,x\theta}}{G_{x\theta}} = \frac{\eta_{x\theta,\theta}}{E_\theta} = 2s c \left[ \frac{s^2}{E_1} - \frac{c^2}{E_2} + \left( \frac{1}{2G_{12}} - \frac{v_{21}}{E_1} \right) (c^2 - s^2) \right], \quad (3.118)$$

$$E_r = E_3, \quad (3.119)$$

$$\frac{\eta_{r,x\theta}}{G_{x\theta}} = \frac{\eta_{x\theta,r}}{E_r} = 2 \frac{v_{23} - v_{13}}{E_3} s c, \quad (3.120)$$



$$\frac{1}{G_{x\theta}} = 4 \left( \frac{1 + 2\nu_{21}}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) s^2 c^2 + \frac{(c^2 - s^2)^2}{G_{12}}, \quad (3.121)$$

$$\frac{1}{G_{xr}} = \frac{c^2}{G_{13}} + \frac{s^2}{G_{23}}, \quad (3.122)$$

$$\frac{\eta_{xr,\theta r}}{G_{\theta r}} = \frac{\eta_{\theta r,xr}}{G_{xr}} = \left( \frac{1}{G_{13}} - \frac{1}{G_{23}} \right) sc, \quad (3.123)$$

$$\frac{1}{G_{\theta r}} = \frac{s^2}{G_{13}} + \frac{c^2}{G_{23}}. \quad (3.124)$$

Для пулрузионного стержня угол ориентации волокон  $\varphi = 0$ , тогда  $c = 1$ ,  $s = 0$ . Выражения (3.121)-(3.124) сведутся к виду:

$$\eta_{\theta,x\theta} = \eta_{x\theta,\theta} = \eta_{r,x\theta} = \eta_{x\theta,r} = \eta_{xr,\theta r} = \eta_{\theta r,xr} = \eta_{x,x\theta} = \eta_{x\theta,x} = 0, \quad (3.125)$$

$$E_x \nu_{x\theta} = E_\theta \nu_{\theta x}, \quad E_x \nu_{xr} = E_r \nu_{rx}, \quad E_\theta \nu_{\theta r} = E_r \nu_{r\theta}, \quad (3.126)$$

$$G_{12} = G_{x\theta}, \quad (3.127)$$

$$G_{13} = G_{xr}, \quad (3.128)$$

$$G_{23} = G_{\theta r}. \quad (3.129)$$

Для решения поставленной задачи достаточно двух координат  $x$  и  $r$ , поскольку все точки с одинаковыми координатами находятся в одинаковых условиях. Поэтому в меридиональных плоскостях при принятых допущениях касательные напряжения возникать не будут. Кроме того, для учета температурного расширения материала, а также его химической усадки при отверждении необходимо в уравнения деформаций добавить дополнительные слагаемые. С учетом вышесказанного, выражения для деформаций примут вид:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{x\theta}}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu_{xr}}{E_r} \sigma_r + \alpha_x T + \varepsilon_{\chi x}, \quad (3.130)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\nu_{\theta x}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu_{\theta r}}{E_r} \sigma_r + \alpha_\theta T + \varepsilon_{\chi \theta}, \quad (3.131)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{v_{rx}}{E_x}\sigma_x - \frac{v_{r\theta}}{E_\theta}\sigma_\theta + \frac{1}{E_r}\sigma_r + \alpha_r T + \varepsilon_{\chi r}, \quad (3.132)$$

Здесь  $\alpha_x$ ,  $\alpha_\theta$ ,  $\alpha_r$ , – коэффициенты линейного термического расширения в соответствующих направлениях;  $T=T(r,x)$  – функция температуры;  $\varepsilon_{\chi r}$ ,  $\varepsilon_{\chi x}$ ,  $\varepsilon_{\chi\theta}$  – деформации от химической усадки материала в соответствующих направлениях [16].

Будем рассматривать пултрузионный стержень, состоящий из однонаправленных продольных волокон, как трансверсально-изотропное цилиндрическое тело. Для такого тела

$$\begin{aligned} E_r = E_\theta = E, v_{r\theta} = v_{\theta r} = v, v_{x\theta} = v_{x\theta}, v_{\theta x} = v_{rx}, \\ \alpha_r = \alpha_\theta = \alpha_{KTR}, \varepsilon_{\chi r} = \varepsilon_{\chi\theta} = \varepsilon_\chi. \end{aligned} \quad (3.133)$$

Химической усадкой и температурным расширением материала вдоль волокон пренебрегаем, т.е.  $\varepsilon_{\chi x} = 0$ ,  $\alpha_x = 0$ .

Кроме того, предполагаем, что имеет место плоское деформированное состояние, т.е.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 = 0. \quad (3.134)$$

При этом необходимо устремить в бесконечность осевой модуль упругости для предотвращения появления паразитных напряжений вследствие эффекта Пуассона:

$$E_x = \infty. \quad (3.135)$$

Такую модель можно использовать, поскольку модуль упругости однонаправленного композита значительно выше модули упругости в поперечном направлении.

Тогда

$$v_{xr} = v_{x\theta} = 0. \quad (3.136)$$

Окончательно выражения для деформаций примут вид

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E} - \frac{\sigma_r}{E}v + \alpha_{KTR}T + \varepsilon_\chi, \quad (3.137)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\sigma_\theta}{E}v + \alpha_{KTR}T + \varepsilon_\chi. \quad (3.138)$$

Уравнение равновесия, записанное в цилиндрической системе координат, для рассматриваемой задачи имеет вид [32]:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (3.139)$$

Обозначим перемещения точки в направлении радиуса через  $u$  и представим геометрические уравнения для данного случая в виде

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad (3.140)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}. \quad (3.141)$$

Разрешим выражения (3.137) – (3.138) относительно напряжений. Получим:

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_\theta + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_r - \frac{E}{1-\nu} \alpha_{KTR} T - \frac{E}{1-\nu} \varepsilon_\chi, \quad (3.142)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_r + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_\theta - \frac{E}{1-\nu} \alpha_{KTR} T - \frac{E}{1-\nu} \varepsilon_\chi. \quad (3.143)$$

Модуль упругости композиции волокно/связующее вычисляется по формуле [123]:

$$E = \frac{\pi \cdot E_m \cdot r(\lambda)}{2 \cdot \nu_f \cdot (1 - \nu_m^2)}, \quad (3.144)$$

где  $E_m$  – модуль упругости отвердевшего связующего (матрицы),  $\nu_m$  – коэффициент Пуассона матрицы, безразмерный параметр  $r(\lambda)$  вычисляется как

$$r(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1-\lambda^2}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{1+\lambda}{1-\lambda}} - \frac{\pi}{4}, \quad \lambda = \frac{4 \cdot \nu_f}{\pi}. \quad (3.145)$$

Будем считать, что модуль упругости связующего пропорционален степени отверждения по правилу смесей [121]:

$$E_m = (1-\alpha)E_0 + E_\infty \cdot \alpha, \quad (3.146)$$

где  $E_0$  и  $E_\infty$  – модули упругости для полностью неотвержденной и полностью отвержденной смолы соответственно. В литературе обычно принимается  $E_0 = E_\infty/1000$ .

По аналогии с выражением (3.146) для расчета коэффициента Пуассона матрицы  $\nu_m$  используется следующее соотношение:

$$\nu_m = (1 - \alpha) \cdot 0.5 + \nu_\infty \cdot \alpha, \quad (3.147)$$

где  $\nu_\infty$  – коэффициент Пуассона полностью отвержденной матрицы в составе композита, 0.5 – максимально возможное значение коэффициента [14].

Коэффициент Пуассона  $\nu$  в выражениях выше может быть также представлен по правилу смесей в виде

$$\nu = \nu_f \cdot \nu_v + (1 - \nu_f) \cdot \nu_m, \quad (3.148)$$

где  $\nu_v$  – коэффициент Пуассона для наполнителя (волокна).

Коэффициент термического расширения в плоскости сечения стержня определяется по формуле [121]:

$$\alpha_{KTR} = (1 + \nu_v) \cdot \alpha_{KTRf} \cdot \nu_f + (1 - \nu_f) \cdot (1 + \nu_m) \cdot \alpha_{KTRm} - \\ - [\nu_v \cdot \nu_f + (1 - \nu_f) \cdot \nu_m] \cdot \frac{\alpha_{KTRf} \cdot E_f \cdot \nu_f + \alpha_{KTRm} \cdot E_m \cdot (1 - \nu_f)}{E_f \cdot \nu_f + E_m \cdot (1 - \nu_f)}, \quad (3.149)$$

где  $\alpha_{KTRf}$ ,  $\alpha_{KTRm}$  – коэффициенты термического расширения волокна и матрицы соответственно,  $E_f$  – модуль упругости волокна.

Объемная химическая усадка связующего определяется при помощи объемного дилатометра как изменение объема связующего до и после отверждения:

$$\chi_V = \frac{V_B - V_A}{V_A}, \quad (3.150)$$

где  $V_A$ ,  $V_B$  - начальный и конечный объемы связующего соответственно.

Химическая усадка для одного из трех направлений будет определяться как

$$\chi_0 = \sqrt[3]{\chi_V + 1} - 1 \approx \frac{1}{3} \chi_V. \quad (3.151)$$

Выражение для определения деформации от химической усадки составлено по аналогии модели Вайт-Хана для трансверсального направления [126]:

$$\varepsilon_\chi = CSC_3 \cdot \chi_0 \cdot 10^{-3.08(1-\alpha)}, \quad (3.152)$$

здесь  $CSC_3$  – коэффициент, учитывающий содержание волокна в композите.

$$CSC_3 = (1 - \nu_f) \cdot (1 + \nu_m) - [\nu_v \cdot \nu_f + (1 - \nu_f) \cdot \nu_m] \frac{E_m \cdot (1 - \nu_f)}{E_f \cdot \nu_f + E_m \cdot (1 - \nu_f)}. \quad (3.153)$$

В модели принимается, что волокна наполнителя не имеют химической усадки.

После дифференцирования (3.143) получим выражение

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_r}{dr} = & \left( \frac{1}{1-\nu^2} \frac{\partial E}{\partial r} + 2E \frac{\nu}{(1-\nu^2)^2} \frac{\partial \nu}{\partial r} \right) \varepsilon_r + \frac{E}{1-\nu^2} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial r} + \\ & + \varepsilon_\theta \left( \left( \frac{1+\nu^2}{1-\nu^2} \right) \frac{E}{1-\nu^2} \frac{\partial \nu}{\partial r} + \frac{\nu}{1-\nu^2} \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} - \\ & - (\alpha_{KTR}T + \varepsilon_\chi) \left[ \frac{1}{1-\nu} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{E}{(1-\nu)^2} \frac{\partial \nu}{\partial r} \right] - \frac{E}{1-\nu} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon_\chi}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (3.154)$$

Подставляя (3.154) в уравнение (3.139) с учетом (3.140), (3.141) имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \left( \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{2\nu}{1-\nu^2} \frac{\partial \nu}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \frac{\partial u}{\partial r} + \left( \frac{\nu}{E} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1+\nu^2}{1-\nu^2} \frac{\partial \nu}{\partial r} - \frac{1}{r} \right) \frac{u}{r} = \\ = (1+\nu) \left[ \alpha_{KTR} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon_\chi}{\partial r} + \left( \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1}{1-\nu} \frac{\partial \nu}{\partial r} \right) (\alpha_{KTR}T + \varepsilon_\chi) \right]. \end{aligned} \quad (3.155)$$

На внешней поверхности стержня в области решения за фильрой имеем следующие граничные условия:

$$\frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_r + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_\theta - \frac{E}{1-\nu} \alpha_{KTR} T - \frac{E}{1-\nu} \varepsilon_\chi = 0, \quad r = R. \quad (3.156)$$

С учетом (3.140), (3.141) имеем

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{R} \cdot \nu - (1+\nu) \cdot (\alpha_{KTR}T + \varepsilon_\chi) = 0, \quad r = R. \quad (3.157)$$

### 3.3.1 Решение задачи определения НДС стержня численным методом

Задача решалась методом конечных разностей. В конечных разностях выражение (3.155) примет вид:

$$A \cdot u_{k,m} + B \cdot u_{k+1,m} + u_{k-1,m} = C, \quad (3.158)$$

где коэффициенты

$$A = \left( \frac{v_{k,m}}{k-1} - 1 \right) \cdot \left( \frac{E_{k+1,m}}{E_{k,m}} - 1 \right) + \left( \frac{1+v_{k,m}^2}{k-1} - 2 \cdot v_{k,m} \right) \cdot \frac{v_{k+1,m} - v_{k,m}}{1-v_{k,m}^2} - 2 - \frac{k}{(k-1)^2}, \quad (3.159)$$

$$B = \frac{E_{k+1,m}}{E_{k,m}} + \frac{1}{k-1} + 2 \cdot \frac{v_{k+1,m} - v_{k,m}}{1-v_{k,m}^2} \cdot v_{k,m}, \quad (3.160)$$

$$C = (1+v_{k,m}) \cdot \tau \cdot [\alpha_{KTR} \cdot T_{k+1,m} + \varepsilon_{\chi_{k+1,m}}] + (1+v_{k,m}) \cdot \tau \cdot \left( \frac{E_{k+1,m}}{E_{k,m}} - \frac{1-v_{k+1,m}}{1-v_{k,m}} - 1 \right) (\alpha_{KTR} \cdot T_{k,m} + \varepsilon_{\chi_{k,m}}). \quad (3.161)$$

Модуль упругости матрицы в конечных разностях представлен в виде

$$E_m = (1-\alpha_{k,m})E_0 + E_\infty \cdot \alpha_{k,m}. \quad (3.162)$$

Коэффициент Пуассона материала определяется по формуле (3.148), а коэффициент Пуассона для матрицы согласно уравнению:

$$v_m = (1-\alpha_{k,m}) \cdot 0.5 + v_\infty \cdot \alpha_{k,m}. \quad (3.163)$$

Деформация от химической усадки

$$\varepsilon_\chi = CSC_{3k,m} \cdot \chi_0 \cdot 10^{-3.08(1-\alpha_{k,m})}. \quad (3.164)$$

Граничные условия (3.157) в конечных разностях представлены в виде

$$\left( \frac{1}{\tau} + \frac{v_{N,m}}{R} \right) u_{N,m} - \frac{1}{\tau} \cdot u_{N-1,m} = (1+v_{N,m}) \cdot \left( \alpha_{KTR} \cdot T_{N,m} + \varepsilon_{\chi_{N,m}} \right), \quad r = R. \quad (3.165)$$

Перемещение в центре стержня равно нулю:

$$u_{1,m} = 0, \quad r = 0. \quad (3.166)$$

Для каждого временного шага составляются матрица коэффициентов (размерностью  $N \times N$ ), и матрица-столбец свободных членов для уравнения (3.158). Далее решается матричное уравнение и определяются неизвестные перемещения  $u$ . Затем определяются деформации на каждом шаге по уравнениям

$$\varepsilon_{\theta,k,m} = \frac{u_{k,m}}{(k-1) \cdot \tau}, \quad (3.167)$$

$$\varepsilon_{r,k,m} = \frac{u_{k+1,m} - u_{k,m}}{\tau}. \quad (3.168)$$

С помощью найденных деформаций определяются напряжения при помощи выражений:

$$\sigma_{\theta,k,m} = \frac{E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}^2} \varepsilon_{\theta,k,m} + \frac{\nu_{k,m} \cdot E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}^2} \varepsilon_{r,k,m} - \frac{E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}} \alpha_{KTR} \cdot T_{k,m} - \frac{E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}} \varepsilon_{\chi k,m}, \quad (3.169)$$

$$\sigma_{r,k,m} = \frac{E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}^2} \varepsilon_{r,k,m} + \frac{\nu_{k,m} \cdot E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}^2} \varepsilon_{\theta,k,m} - \frac{E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}} \alpha_{KTR} \cdot T_{k,m} - \frac{E_{k,m}}{1-\nu_{k,m}} \varepsilon_{\chi k,m}. \quad (3.170)$$

Степень отверждения и температура для решения задачи берутся с узлов конечно-разностной сетки из решения, полученного при решении задачи теплопроводности и отверждения.

Для области решения задачи внутри фильеры граничные условия определяются следующим образом. На каждом временном шаге определяется решение с учетом свободной поверхности стержня (3.158) - (3.165). Далее рассматриваются перемещения на поверхности стержня  $u_{N,m}$ .

Если  $u_{N,m} > 0$  (стержень расширяется), то для такого временного шага граничные условия переопределяются, поскольку фильера ограничивает перемещения в радиальном направлении. В таком случае

$$u_{N,m} = 0, r = R. \quad (3.171)$$

Задача для такого временного шага перерешивается (уравнения (3.158)-(3.161), (3.171)). Случай, когда для некоторых сечений стержня  $u_{N,m} < 0$  имеет место, если сжатие стержня в радиальном направлении за счет достаточно

большой химической усадки превозобладает над расширением стержня от нагрева.

### 3.3.2 Критерий прочности материала

При высоких скоростях пултрузии стержня большого диаметра происходит образование магистральной трещины вследствие превышения напряжениями, возникающими в отвержденной части стержня, предельно допустимых значений для материала. При растяжении поперек волокон наименьшую прочность композиционный материал будет иметь на границе волокно/матрица [11]. В качестве критерия прочности был выбран критерий максимальных напряжений [124]:

$$\sigma_r, \sigma_\theta \leq \sigma_m \cdot \frac{r(\lambda)}{2 \cdot v_f} \cdot (\pi - 4 \cdot v_f), \quad (3.172)$$

где  $\sigma_m$  – прочность отвердевшего связующего. Безразмерный параметр  $r(\lambda)$  вычисляется согласно (3.145).

Так, эпоксидиановая смола с прочностью  $\sigma_m = 70$  МПа с 60-ти процентным содержанием волокна имеет прочность при поперечном растяжении, равную 47.8 МПа.



### 3.4 Определение усилия пултрузии стержня

Усилие, при котором пропитанные связующим волокна проходят через нагретую фильеру (усилие протяжки) является важным технологическим фактором процесса. Однако он имеет большой разброс значений в зависимости от размера изделия, скорости пултрузии и других параметров процесса. С целью выявить закономерности влияния различных конструктивных и технологических параметров процесса на величину усилия протяжки многими авторами разрабатывались различные математические модели, одним из явных недостатков которых является пренебрежение сухим трением композиционного изделия о стенки фильеры в момент окончания его отверждения. Такой подход не всегда является оправданным, в особенности для пултрузии крупногабаритных изделий и изделий с низкой химической усадкой материала. Ниже приводится описание математической модели, позволяющей рассчитать длину и положение участка сухого трения и получить значение полного усилия пултрузии на всей протяженности фильеры.

Рассмотрим последовательность прохождения материала в фильере в процессе пултрузии (рисунок 3.12).

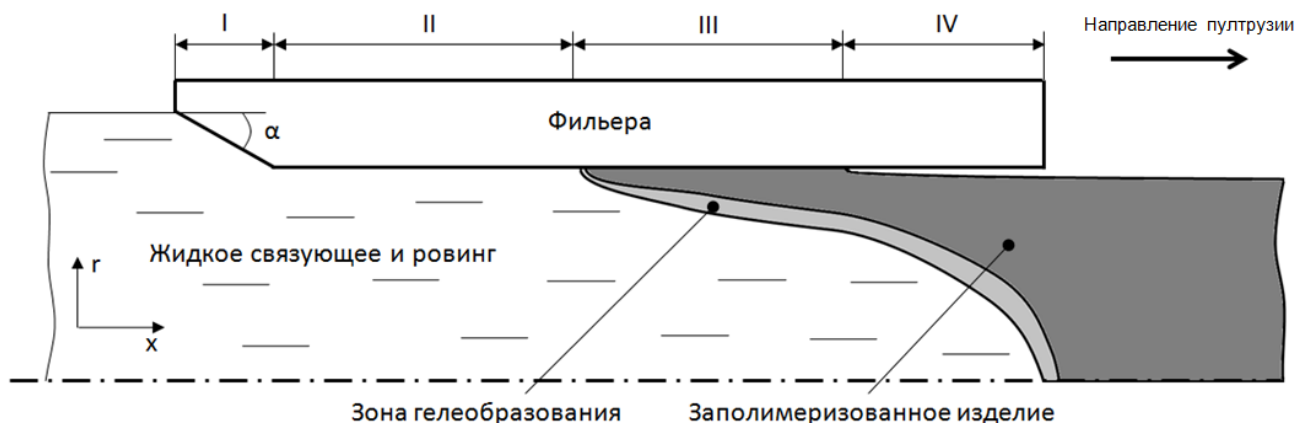


Рисунок 3.12 – Схема модели по определению усилия пултрузии

Пропитанные связующим волокна поступают в конусный входной участок I фильеры, где происходит сжатие пучка и создается определенное давление связующего. Участки II, III, IV относятся к нагреваемому участку фильеры, где происходит отверждение связующего. Участок III характеризуется наличием

трения отвержденного наружного слоя композитного изделия о стенку фильеры вследствие его температурного расширения. На участке IV происходит «отлипание» изделия от стенок фильеры из-за превозобладания химической усадки материала над температурным расширением. Таким образом, усилие пултрузии определяется как результирующая сила отдельных слагаемых, действующих на участках I, II и III.

На участке I возникает сила сопротивления сжатию пучка, которая в осевом направлении может быть записана как [25]:

$$N_{comp} = \iint_{A_1} P_1 \sin \alpha dA_1 \quad (3.173)$$

здесь  $P_1$  – избыточное давление связующего, возникающее в конусном участке фильеры,  $dA_1$  – элементарная площадь поверхности конуса. Величина избыточного давления определяется из решения задачи определения давления связующего, см. раздел 3.2.

На прямом участке фильеры II (рисунок 3.12) имеет место сила вязкого сопротивления, возникающая за счет сдвига тонкого слоя наполнителя между волокнами и стенкой фильеры [58, 115]:

$$N_{visc} = \frac{U}{\delta} \iint_{A_2} \mu \cdot dA_2, \quad (3.174)$$

здесь  $U$  – скорость вытяжки изделия,  $\delta$  – толщина сдвигового слоя связующего,  $\mu$  – вязкость связующего, зависящая от степени отверждения  $\alpha$  и температуры  $T$  (3.64),  $dA_2$  – элементарная площадь поверхности фильеры на участке II.

Толщину сдвигового слоя в модели определяем как [62]

$$\delta = R_f \left( 1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot v_f}{2}} \right), \quad (3.175)$$

здесь  $R_f$  – радиус волокна (наполнителя),  $v_f$  – объемное содержание волокна в композиции волокно/связующее.

На прямом участке фильеры III действует сила трения отвержденного композита о стенку фильеры:

$$N_{fric} = \iint_{A_3} c_{dynamic} \sigma_r dA_3 \quad (3.176)$$

здесь  $c_{dynamic}$  – локальный коэффициент динамического трения,  $\sigma_r$  – радиальное напряжение, действующее со стороны изделия на стенки фильеры,  $dA_3$  – элементарная площадь поверхности фильеры на участке.

Суммарное усилие пултрузии рассчитывается по формуле:

$$N = N_{comp} + N_{visc} + N_{fric} \quad (3.177)$$

Положение начала участка III определяется из решения задачи теплопроводности и отверждения (3.1). Начало участка характеризуется значением степени отверждения на поверхности стержня, равным 0.95.

Для определения начала участка IV (рисунок 3.12) и радиального напряжения  $\sigma_r$  в формуле (3.176) решается задача определения напряженно-деформированного состояния композитного материала внутри фильеры (см. раздел 3.3). Если перемещение точки поверхности стержня, определяемое по формулам (3.158) - (3.165) с учетом свободной поверхности стержня,  $u_{N,m} < 0$  (стержень сжимается), то такая точка характеризует начало «отлипания» композита от стенки фильеры и конец участка IV.

## 4 Экспериментальная проверка результатов моделирования

### 4.1 Экспериментальная проверка моделирования температуры и степени отверждения связующего

Эксперименты проводились на установке по производству стеклопластиковой арматуры «ЛИСА-1» (ООО «Машспецстрой» г.Пермь). Длина печи полимеризации – 6 м, расстояние от выхода из печи до отрезного устройства составляло 4.4 м. Тип нагрева печи – инфракрасный. Тип протягивающего устройства – валковый. Линия способна производить арматуру с диаметром от 4 до 16 мм с производительностью от 2 до 8 м/мин. (рисунок 4.1).

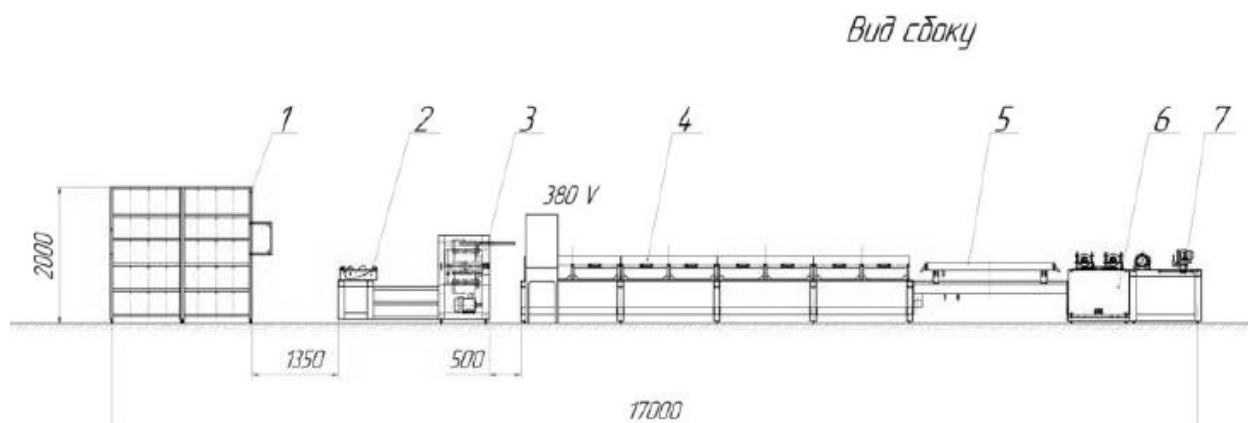


Рисунок 4.1 – Линия по производству стеклопластиковой арматуры «ЛИСА-1»  
 1 – Стеллаж со шпуляриками, 2 – Пропиточное устройство, 3 – Обмоточник,  
 4 – Печь, 5 – Ванна, 6 – Протягивающее устройство, 7 – Устройство отрезное.

Управление температурным режимом в печи полимеризации, скоростью пултрузии и приводом обмотки осуществлялось с помощью программного модуля установки (рисунок 4.2).

С помощью пульта управления имелась возможность выставлять температуру на каждой из 8 секций печи полимеризации (длиной 0.75 м каждая). Температура воздуха в печи полимеризации контролировалась с помощью 8 термопар (по одной на секцию).

Стеклопластиковый стержень изготавливался на основе эпоксидного связующего №2, характеристики которого представлены в таблицах 2.4 и 2.5 (раздел 2.2), и стеклоровинга ЕС-24-4800-350, свойства которого указаны в

таблице 2.3 (раздел 2.1). При этом использовалось 15 ровингов, что обеспечивало содержание волокна 77,7% по массе или примерно 60% по объему.



Рисунок 4.2 – Пульт управления линией «ЛИСА-1»

В первом эксперименте для определения температуры внутри стержня линия запускалась без включения обогрева печи. После того, как часть неотвержденного стержня проходила вторую секцию печи, линия останавливалась, внутрь стержня помещалась незащищенная термопара в середине первой секции печи, под термодатчиком 4 (рисунок 4.3). После этого печь закрывалась и включался обогрев первых двух секций печи без включения тянущего устройства. Заданная температура нагрева на пульте управления – 230<sup>0</sup>С.

С начала момента включения печи каждые 30 сек. фиксировались значения температур внутри стержня и температура воздуха в первой секции печи. Эксперимент продолжался до достижения внутри печи заданной температуры воздуха. В результате эксперимента была получена зависимость температуры от времени нагрева (рисунок 4.4).



Рисунок 4.3 – Эксперимент по определению температуры внутри стержня  
1, 2, 3 – ИК излучатели, 4 – термодатчик первой секции печи, 5 – пропитанный связующим стеклоровинг, 6 – Термопара.

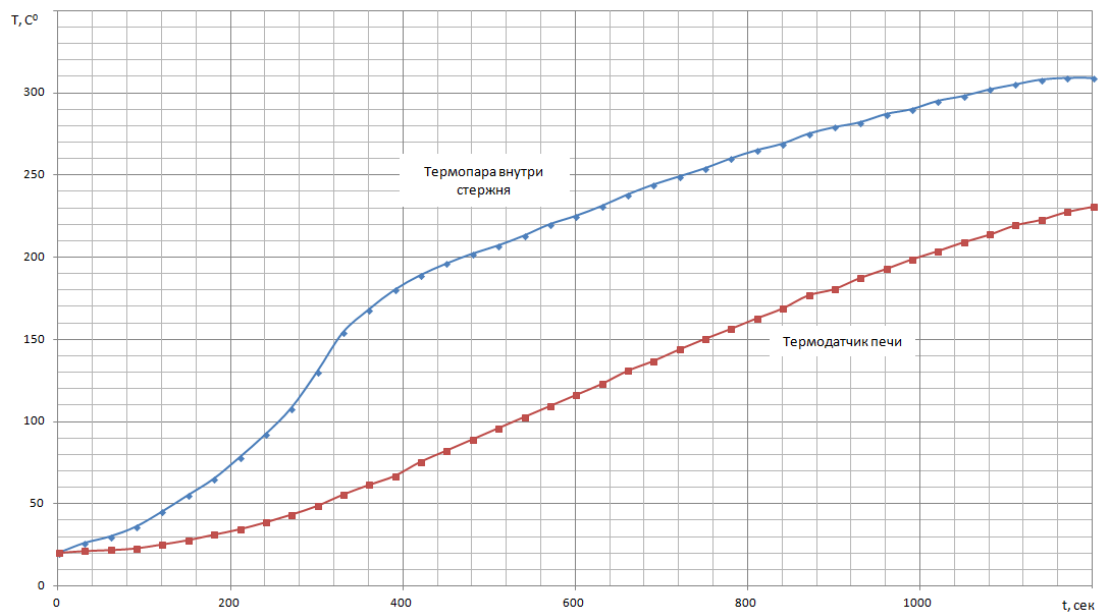


Рисунок 4.4 – Зависимости температуры воздуха в печи и температуры внутри стержня от времени нагрева при включении холодной печи

Результаты показали, что температура внутри стержня растет быстрее температуры окружающего его воздуха из-за воздействия ИК излучения непосредственно на поверхность стержня и протекающей в стержне экзотермической реакции отверждения связующего.

Во втором эксперименте термопара помещалась в центр сечения стержня и затягивалась вместе с ним в прогретую до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  первую секцию печи. После того, когда термопара оказывалась в центре первой секции печи, линия останавливалась. Заданная температура нагрева на пульте управления также равнялась  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Каждые 30 секунд фиксировались значения температур внутри стержня и температура воздуха в первой секции печи. Эксперимент продолжался до стабилизации температуры воздуха в печи  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Полученная в результате эксперимента зависимость температуры от времени нагрева представлена на рисунке 4.5. Как видно из графика, скорость прогрева стержня увеличилась. Несмотря на то, что ИК излучение действует на поверхность стержня и сразу начинает нагревать его, во втором случае стержень меньше отдает тепла в окружающий его воздух, поэтому прогревается быстрее.

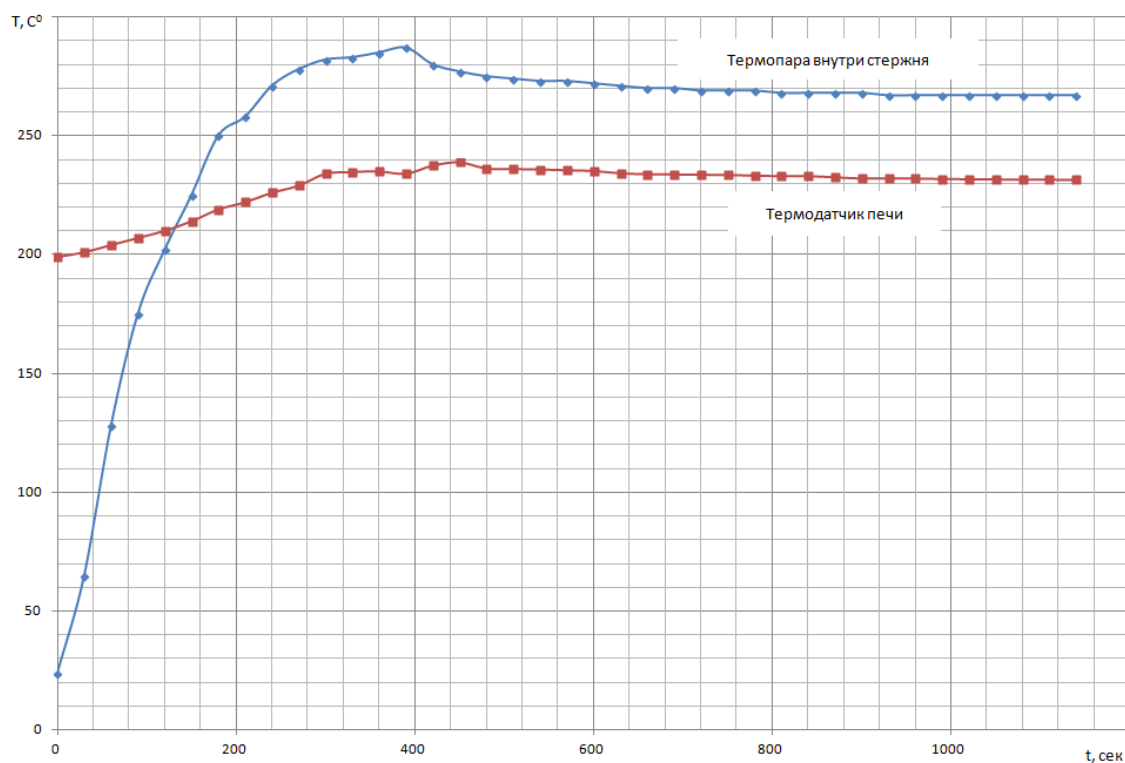


Рисунок 4.5 – Зависимости температуры воздуха в печи и температуры внутри стержня от времени нагрева при прогретой печи

Кроме того, во втором эксперименте ИК нагреватели уже вышли на заданный режим работы (температура поверхности нагревателя  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), тогда как в первом случае для выхода нагревателя на заданную мощность требуется некоторое время. Во втором эксперименте максимальный пик температуры внутри стержня не превысил  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$  по сравнению с первым экспериментом, когда максимальное значение температуры достигло  $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это можно объяснить тем, что при достижении температуры воздуха в печи, равной заданной, срабатывает автоматика и интенсивность ИК излучения падает.

В таблице 4.1 приведены дополнительные параметры математической модели, используемые в расчете. Плотность связующего в зависимости от содержания компонентов рассчитывалась по формуле:

$$\rho_r = 0.73 \cdot 1.16 + 0.19 \cdot 0.925 + 0.08 \cdot 1.07 = 1.1 \text{ г/см}^3. \quad (4.1)$$

Таблица 4.1 – Параметры математической модели

Параметр	Значение
Плотность неотвержденной смолы, $\text{г/см}^3$	1.16
Плотность неотвержденного отвердителя, $\text{г/см}^3$	0.925
Плотность разбавителя, $\text{г/см}^3$	1.07
Удельная теплоемкость неотвержденного связующего, $\text{Дж}/(\text{г}\cdot\text{C}^0)$	1.686
Коэффициент теплопроводности связующего, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{C}^0)$	0.2
Температура окружающего воздуха, $\text{C}^0$	24
Температура поверхности ИК нагревателя, $\text{C}^0$	300
Степень черноты поверхности стержня	0.7

Для сопоставления результатов эксперимента с численными, в модели задана скорость пултрузии  $2\text{ м/мин}$  при длине печи  $40\text{ м}$ . Поскольку процесс пултрузии считается стационарным, при таких заданных параметрах интервал  $30\text{ секунд}$  на экспериментальных кривых соответствует прохождению любой точки композитного стержня расстояния, равного  $1\text{ метру}$ .

Моделирование осуществлялось при двух условиях нагрева. В первом случае температура ИК нагревателя задавалась согласно графику выхода нагревателя на рабочий режим (рисунок 4.6), при достижении температуры ИК



нагревателя  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (около 7 минут нагрева) она принималась постоянной для оставшегося времени. Для моделирования второго эксперимента температура ИК нагревателя принималась постоянной, равной  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (нагреватель вышел на заданный режим работы).

Путем сравнения результатов математической модели установлено, что для конечно-разностной модели при таких заданных параметрах необходимо в продольном направлении задать не менее 100 точек, а вдоль радиуса стержня – не менее 80. Код программы приведен в приложении 2.

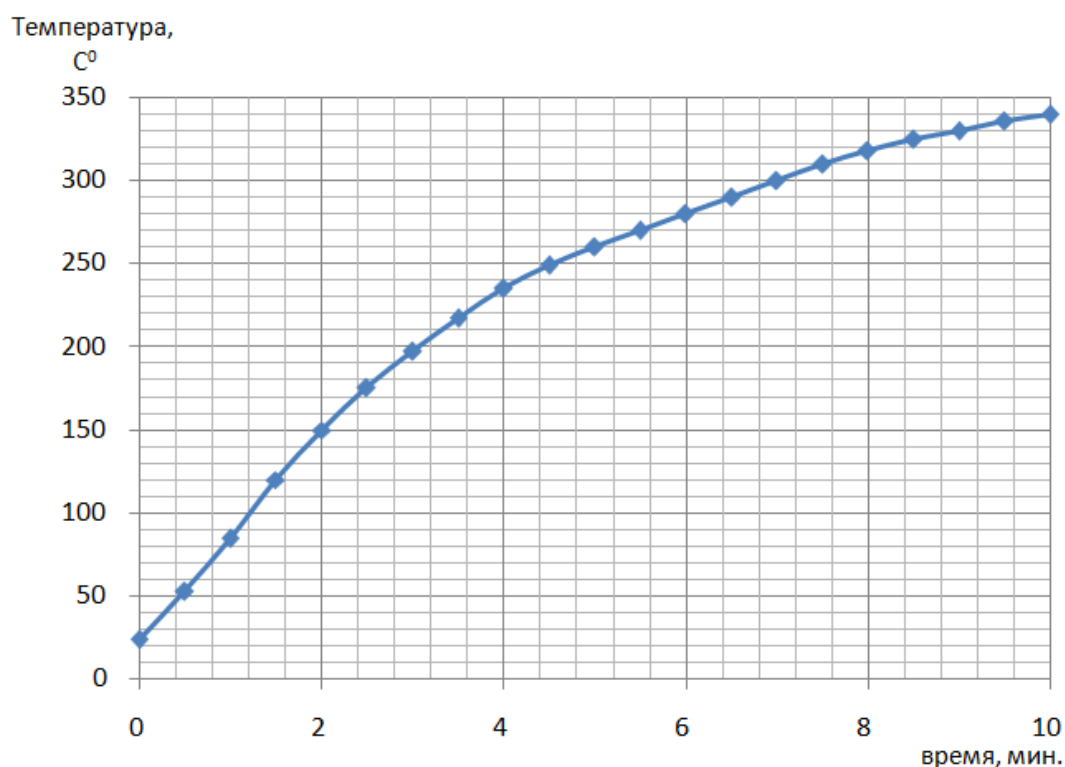


Рисунок 4.6 – График прогрева ИК излучателя типа FSR 250W [18]

На рисунках 4.7 и 4.8 показаны полученные в результате численного расчета зависимости температуры от продольной координаты  $x$ . Точками показаны экспериментальные значения. Линией показано распределение температуры, полученное в результате моделирования.

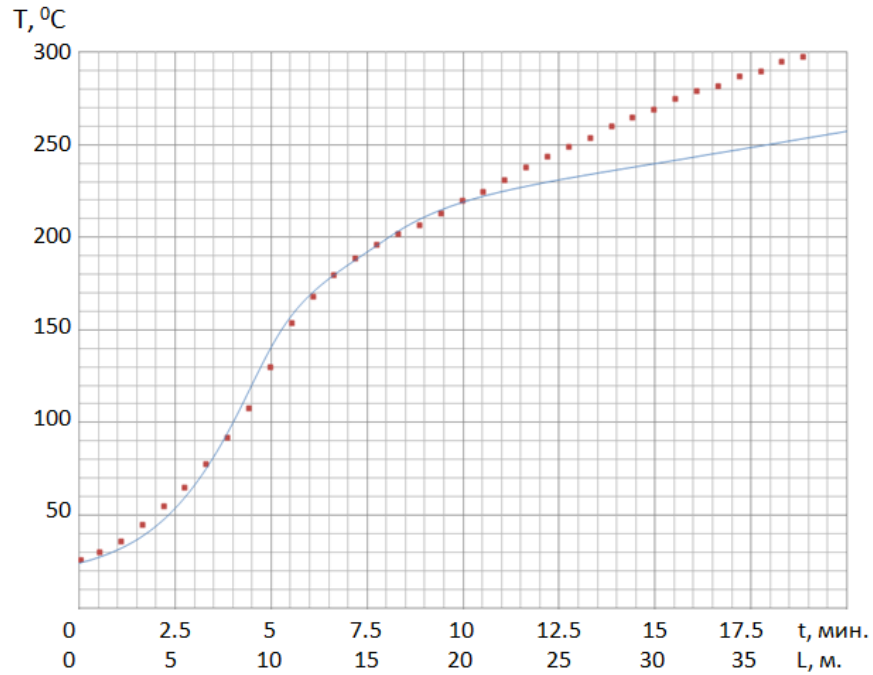


Рисунок 4.7 – График температуры в зависимости от продольной координаты.  
Эксперимент №1.

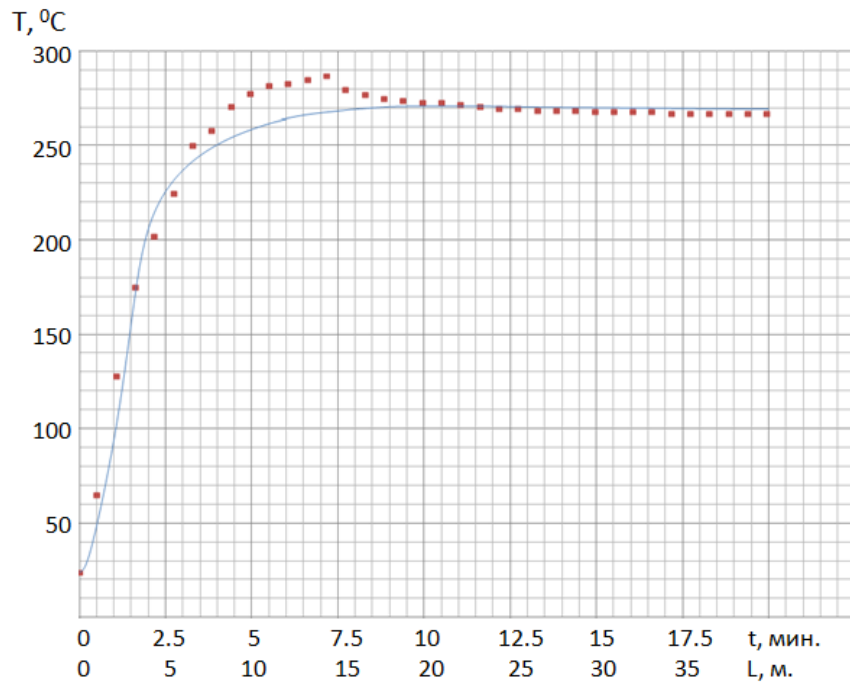


Рисунок 4.8 – График температуры в зависимости от продольной координаты.  
Эксперимент №2

Как видно, результаты моделирования хорошо воспроизводят эксперимент до температуры 250  $^\circ\text{C}$ . Вблизи этой отметки происходят сильные расхождения, свидетельствующие о том, что реальная температура в стержне превышает расчетную. Возможно предположить, что при температуре выше 250  $^\circ\text{C}$

происходит деструкция отвержденного связующего с выделением дополнительного количества теплоты. На это косвенно может указывать тот факт, что по окончании эксперимента №2 композитный стержень полностью обугливается (рисунок 4.9)



Рисунок 4.9 – Обугленный образец после проведения эксперимента

Поскольку эксперименты по определению точного значения температуры деструкции для данного связующего не проводились, было решено принять значение температуры  $250^{\circ}\text{C}$  как ограничение, при котором разработанная математическая модель применима с достаточной степенью достоверности.

Для определения степени отверждения с помощью метода ДСК были определены остаточные тепловые эффекты отверждения связующего в образцах композитной арматуры, полученных при различных скоростях протяжки. Измерения проводились в динамическом режиме на приборе METTLER TOLEDO с использованием программного обеспечения STAR. При помощи разработанной программы выполнялось моделирование отверждения композитной арматуры при двух скоростях протяжки: 2.5 и 3 м/мин при заданном температурном режиме в печи полимеризации ( $^{\circ}\text{C}$ ): [310,310,250,250,210,160,150,150]. В первом случае получен график степени отверждения связующего вдоль центральной оси стержня

и на его поверхности (рисунок 4.10). Расчетное значение степени отверждения на момент выхода изделия из печи составило 0.969.

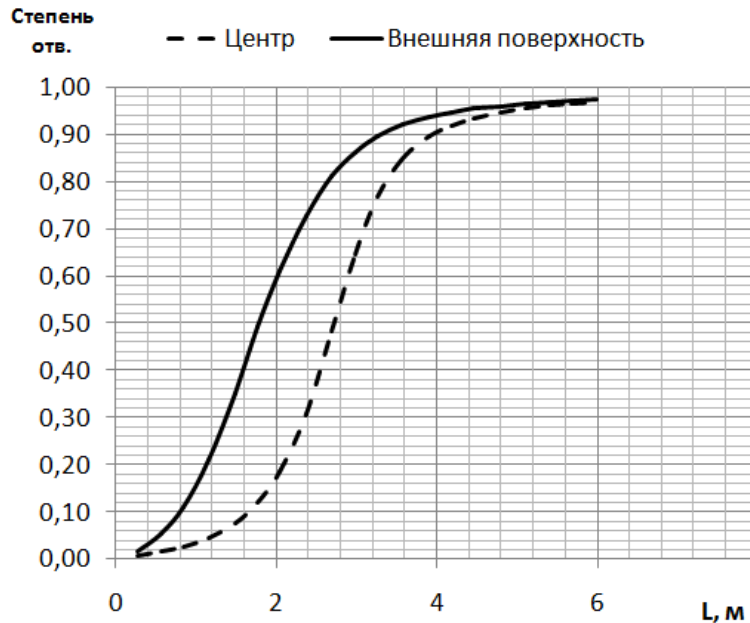


Рисунок 4.10 – График степени отверждения связующего вдоль центральной оси стержня и на его поверхности при скорости протяжки 2.5 м/мин

Во втором случае получен график степени отверждения связующего вдоль центральной оси стержня и на его поверхности при скорости протяжки 3 м/мин (рисунок 4.11). Расчетное значение степени отверждения на момент выхода изделия из печи составило 0.942.

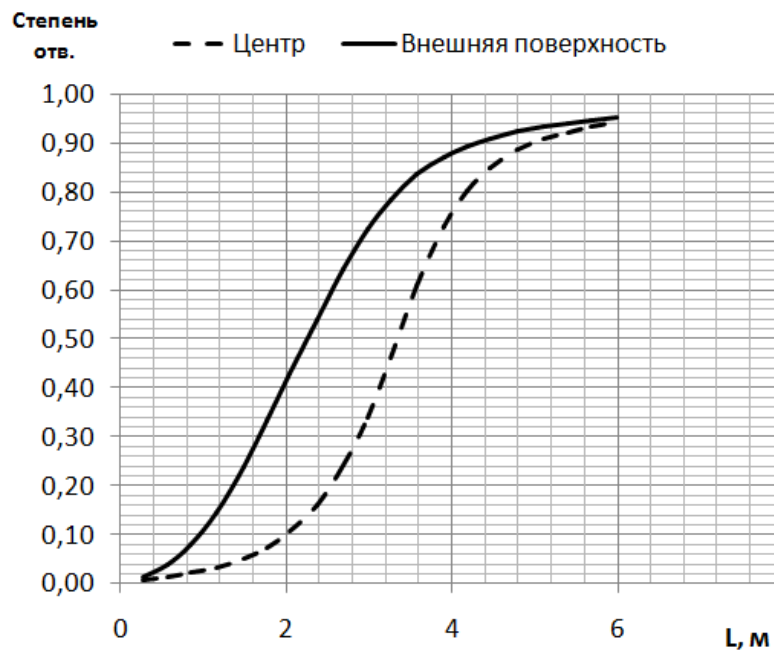


Рисунок 4.11 – График степени отверждения связующего вдоль центральной оси стержня и на его поверхности при скорости протяжки 3 м/мин

При вышеуказанных температурном режиме и скоростях протяжки были получены прутки композитной арматуры диаметром 8 мм, из которых при помощи гильотинных ножниц вырезались образцы композитного материала размером 4x4 мм и весом до 15 мг. С помощью метода ДСК были определены остаточные тепловые эффекты отверждения связующего в образцах композитной арматуры (рисунок 4.12 и 4.13).

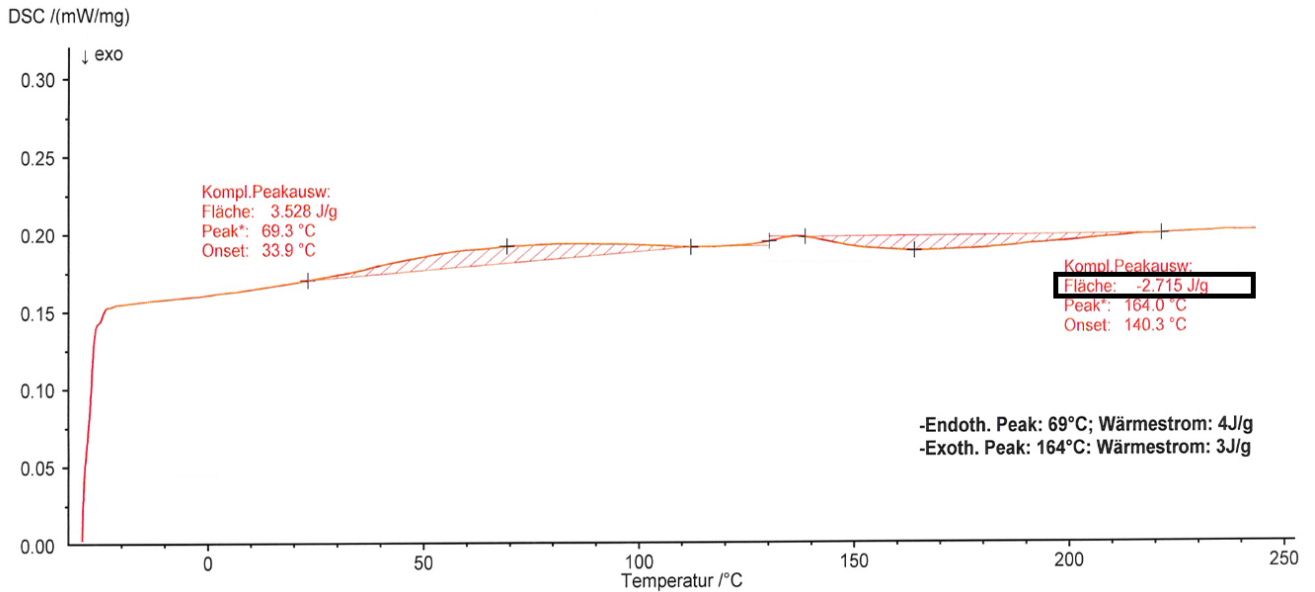


Рисунок 4.12 – Термограмма ДСК отвержденного образца композитной арматуры на основе связующего №2 при скорости протяжки 2.5 м/мин

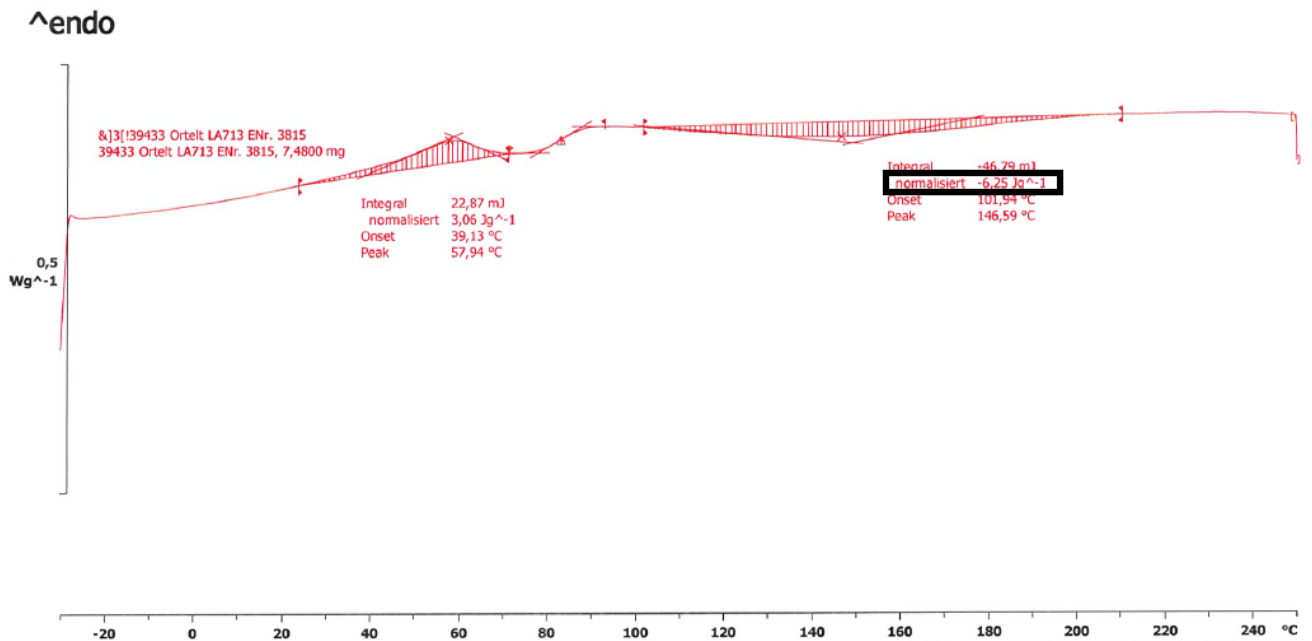


Рисунок 4.13 – Термограмма ДСК недоотвержденного образца композитной арматуры на основе связующего №2 при скорости протяжки 3 м/мин

Степень отверждения  $\alpha$  связующего в стеклопластике определялась как отношение разности значений тепловых эффектов отверждения связующего без наполнителя ( $\Delta H_r$ ) и доотверждения ( $\Delta H_c$ ) в исследуемом образце стеклопластика к исходному значению теплового эффекта реакции отверждения связующего  $\Delta H_r$  по формуле (4.2) [1].

$$\alpha = \left( 1 - \frac{\Delta H_c \cdot C_r}{\Delta H_r \cdot C_c} \right), \quad (4.2)$$

где  $\Delta H_r = 456.44$  Дж/г – тепловой эффект отверждения связующего;  $\Delta H_c$  – тепловой эффект доотверждения связующего в стеклопластике, Дж/г;  $C_r = 1$  – массовая доля связующего;  $C_c = 0.777$  – массовая доля связующего в стеклопластике.

В таблице 4.2 приведены расчетные и экспериментальные (по результатам ДСК) значения степени отверждения.

Таблица 4.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений степени отверждения связующего в контрольных образцах стеклопластика на основе связующего №2

Скорость протяжки, м/мин	$\Delta H_c$ , Дж/г	Степень отверждения расчетная	Степень отверждения экспериментальная
2.5	2.715	0.969	0.973±0.03
3	6.25	0.942	0.939±0.03

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о применимости разработанной математической модели.

#### 4.2 Экспериментальная проверка результатов моделирования усилия протяжки

С помощью разработанной математической модели были проведены расчеты давления связующего для формующей втулки, представленной на рисунке 2.5. В качестве наполнителя использовался стеклоровинг ЕС-24-4800-350, связующее №2 на основе эпоксидной смолы СУD-128 (таблица 2.4). Текст программы приведен в приложении 3.

Исходные данные для программы представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные для программы

Характеристика	Значение
Радиус элементарного волокна, м	$12 \cdot 10^{-6}$
Количество нитей ровинга	15
Плотность, гр/см <sup>3</sup>	2.56
Линейная плотность, текс	4800
Объемное содержание волокна	0.6
Вязкость связующего, Па·с	2.0
Конечный радиус формирующей фильеры R, мм	5.5
Угол наклона стенки фильеры $\varphi_{kI}$ , град.	7.97
Угол наклона стенки фильеры $\varphi_{kII}$ , град.	1.22
Длина первого участка, $L_{kI}$ , мм	17.25
Длина второго участка, $L_{kII}$ , мм	40.00
Скорость протяжки, м/мин	2

В результате расчетов получена кривая давления связующего по центральной оси формирующей втулки (рисунок 4.14).

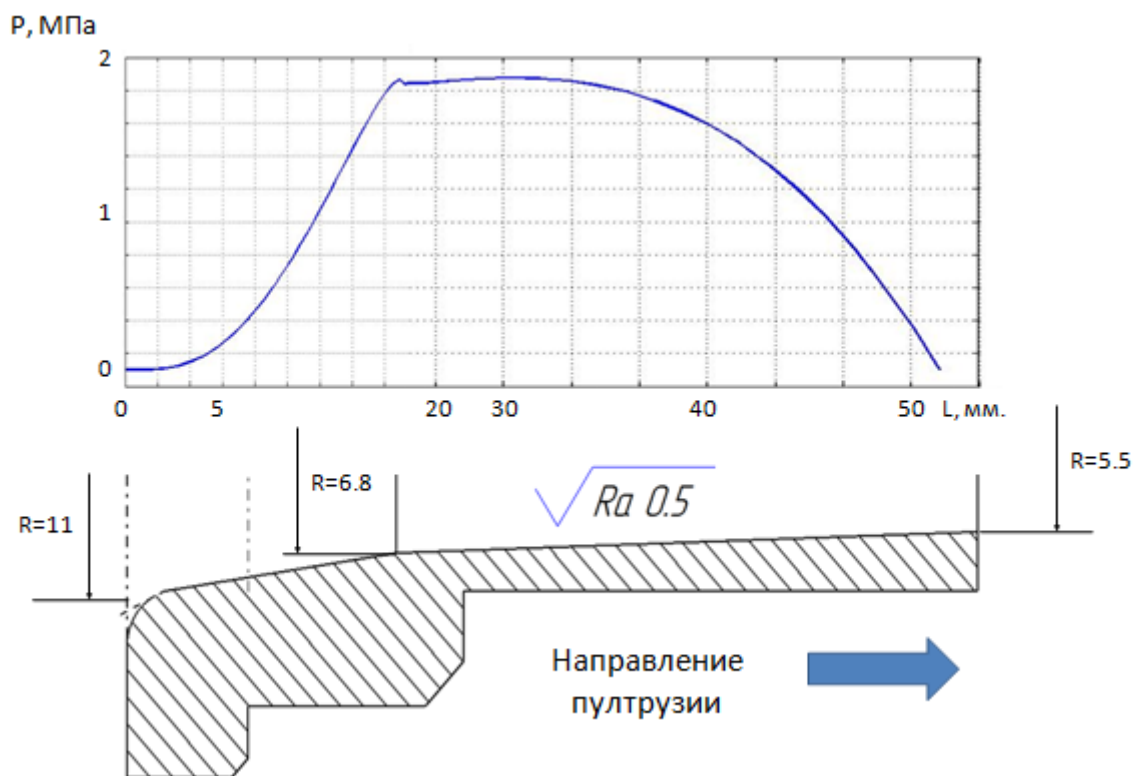


Рисунок 4.14 – График давления связующего внутри формирующей втулки

Экспериментальная проверка полученного решения проводилась путем измерения усилия протяжки, возникающего из-за сжатия пучка волокон в формирующей втулке при удалении избыточного материала согласно уравнению:

$$N = \iint_{A_I} P_I \cdot \sin \varphi_{kI} dA_I + \iint_{A_{II}} P_{II} \cdot \sin \varphi_{kII} dA_{II}, \quad (4.3)$$

где  $P_I$ ,  $P_{II}$  – давление связующего, возникающее в первом и втором конусном участках,  $dA_I$ ,  $dA_{II}$ , – элементарные площади внутренней поверхности втулки для первого и второго участков соответственно. Расчетное усилие пултрузии составило при этом 39.2 кг. В результате эксперимента было определено, что усилие пултрузии составляет в среднем  $37.5 \pm 0.1$  кг. Погрешность составила 4.5 %. Поскольку величина давления непосредственно и в наибольшей степени оказывает влияние на величину усилия пултрузии, в данном случае можно сделать вывод о том, что найденное значение давления близко к действительному.

Величина усилия протяжки и методика по ее определению позволили оценить возможности тянущего устройства, что отражено в акте о внедрении №1 (см. приложение 1).

#### **4.3 Определение кинетических и реологических параметров связующего для пултрузии стержней и труб**

Для пултрузии стержней и труб в заводских условиях применялось связующее №1 на основе термореактивной смолы EPOTEC YDL 680 (таблица 2.1).

Для определения параметров кинетики отверждения связующего были проведены лабораторные исследования. Измерения проводились на приборе NETZSCH DSC 204 Phoenix в интервале температур 40-250 °С в динамической атмосфере аргона со скоростями 5, 10 и 15 К/мин. Навеска смолы составляла около 10 мг. Исходные ДСК-кривые изображены на рисунке 4.15.



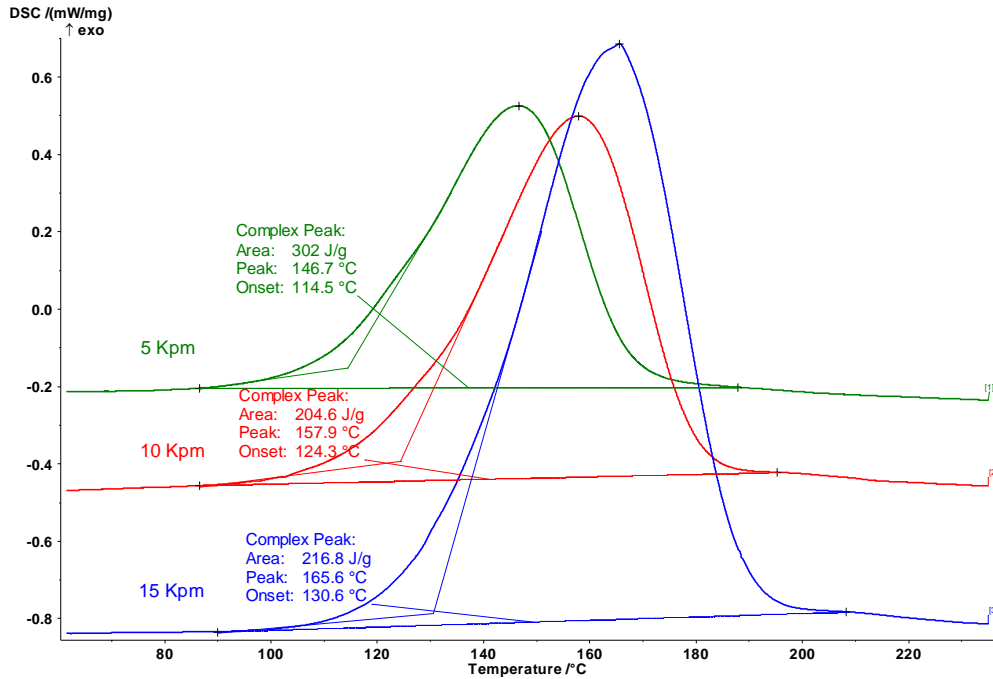


Рисунок 4.15 – Полученные ДСК-кривые для связующего на основе EPOTEC YDL 680

Исходя из полученных результатов было определено среднее значение теплоты отверждения  $H_{tot} = 241.13$  Дж/г. Затем был проведён изоконверсионный анализ методом Фридмана, в результате которого получена оценка энергии активации для разных степеней превращения. График зависимости приведён на рисунке 4.16.

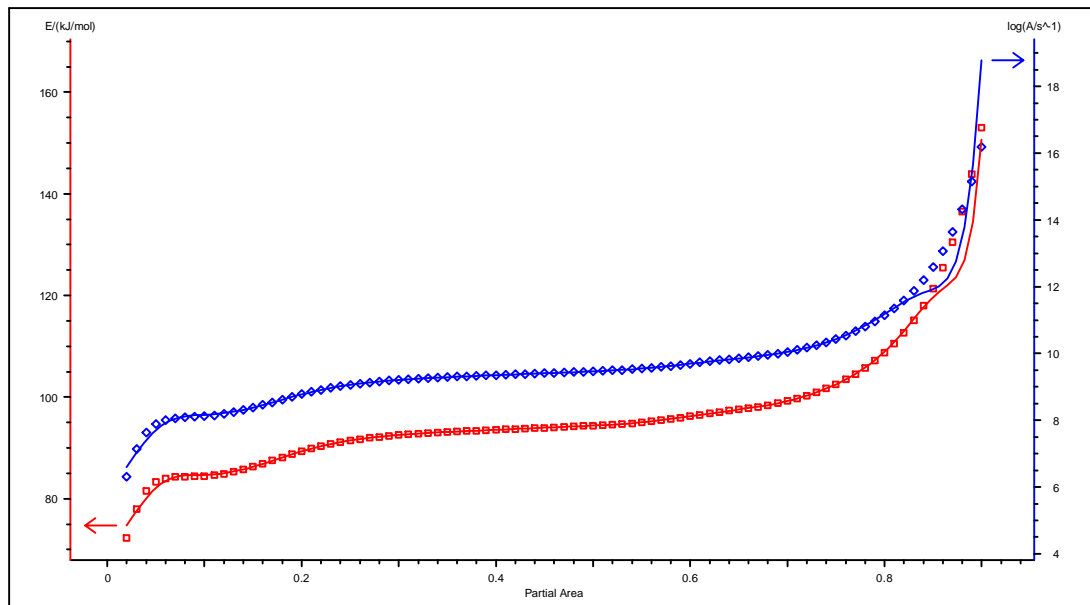


Рисунок 4.16 – Графики зависимостей энергии активации и предэкспоненциального множителя, полученных методом Фридмана

В результате исследований было определено, что из одностадийных процессов наилучшее описание даёт модель автокаталитической реакции с уравнением:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha) \cdot (1 - \alpha)^{1.2},$$

$$k_1 = 10^{8.54} \cdot \exp\left(-\frac{88.3}{R \cdot T}\right), \quad k_2 = 10^{8.752} \cdot \exp\left(-\frac{88.3}{R \cdot T}\right). \quad (4.4)$$

График сравнения экспериментальных и расчётных кривых для модели (4.4) приведён на рисунке 4.17. Удовлетворительная сходимость расчётных результатов с экспериментальными свидетельствует об адекватности выбранной модели в рамках прикладных (технологических) решений.

Для определения кривых вязкости связующего использовался вискозиметр Брукфильда САР2000+Н с рабочим узлом конус-плоскость на 7 конусе при 200 об/мин. при 60, 70 и 80 °С. На рисунке 4.18 показаны экспериментально полученные кривые вязкости для трех температур.

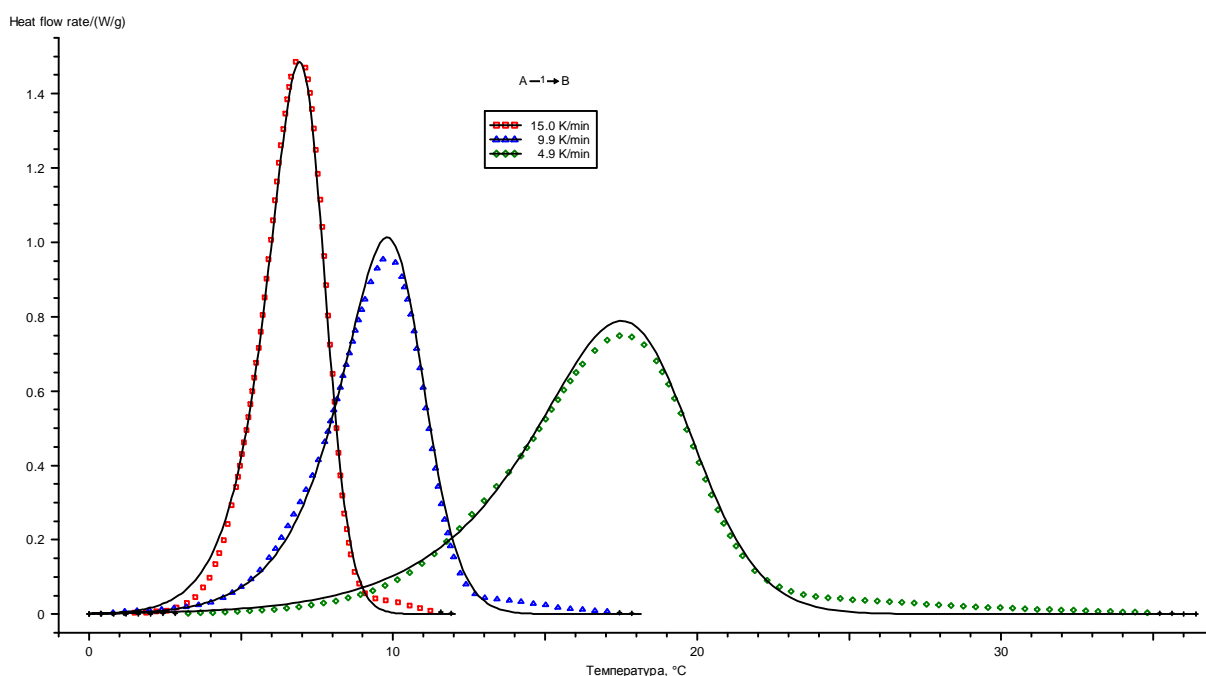


Рисунок 4.17 – ДСК-кривые для модели одностадийной автокаталитической реакции. Точками показаны экспериментальные данные.

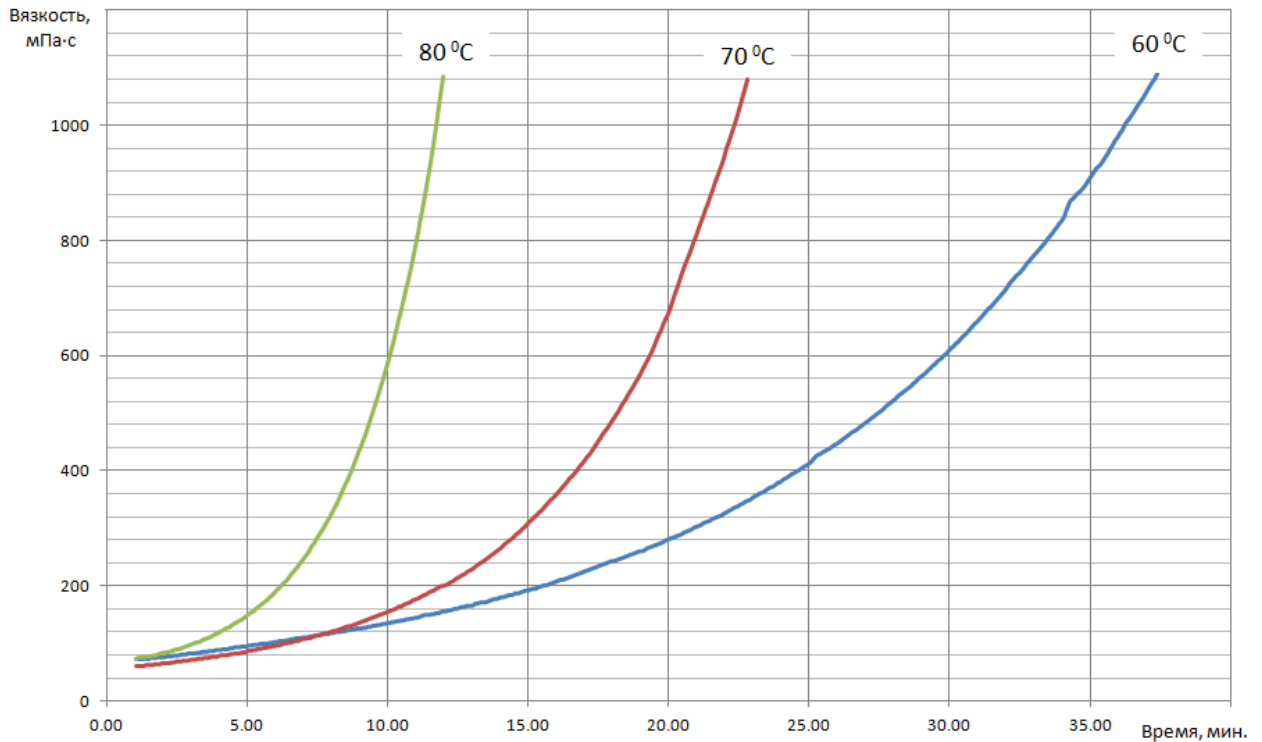


Рисунок 4.18 – Экспериментальные кривые вязкости для трех температур

Вязкость связующего в модели представлена в виде уравнения [82]:

$$\mu = \mu_{\infty} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R_g \cdot T} + k_{\mu} \cdot \alpha\right) \quad (4.5)$$

Для определения параметров  $\mu_{\infty}$  (предэкспоненциальный фактор) и  $E_a$  (энергия активации) использовалось условие начальной вязкости  $\alpha = 0$ .

Представим (4.5) в виде:

$$\ln(\mu) = \ln(\mu_{\infty}) + \frac{E_a}{R_g \cdot T}. \quad (4.6)$$

После линеаризации уравнения (4.6) пересечение полученной прямой линии с вертикальной осью покажет значение величины  $\mu_{\infty}$ , а угол ее наклона будет равен  $E_a/R_g$  (рисунок 4.19).

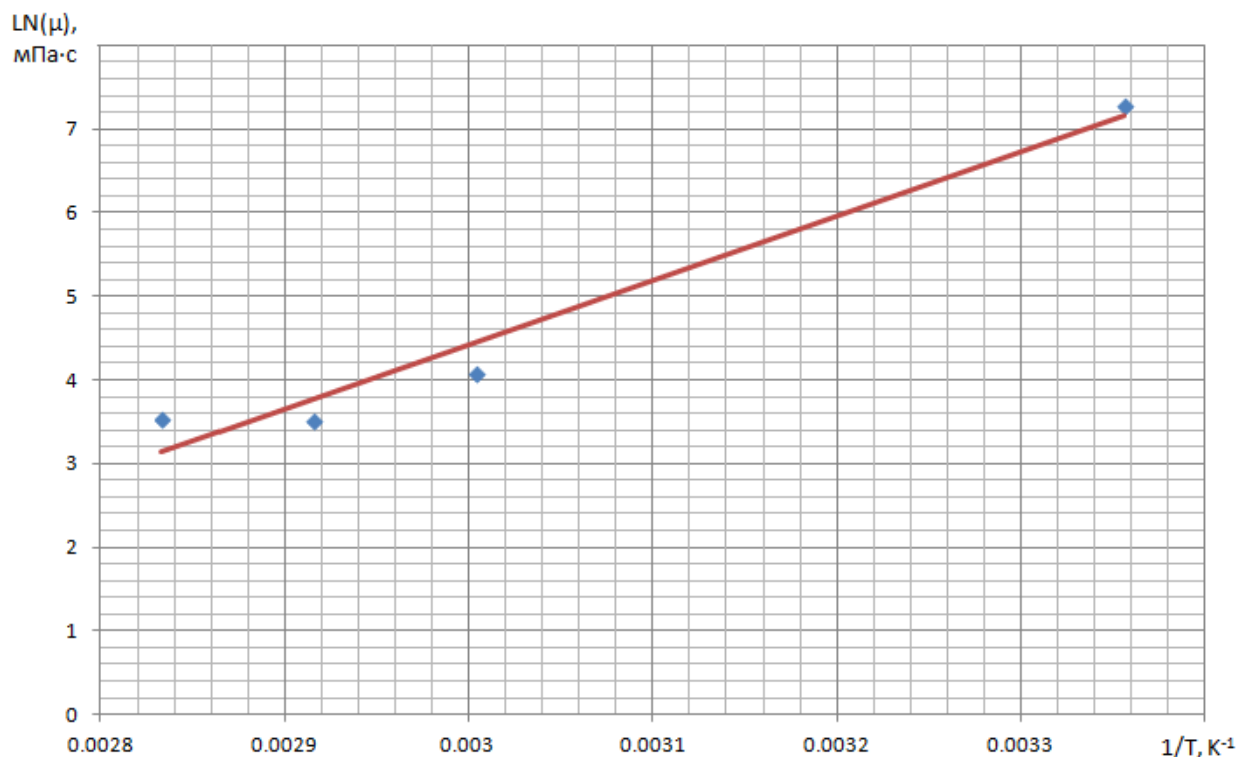


Рисунок 4.19 – График зависимости логарифма начальной вязкости от обратной температуры. Точками показаны экспериментальные значения.

Результаты аппроксимации показаны на рисунке 4.20 ( $\mu_{\infty} = 7.59 \cdot 10^{-12}$  Па·с,  $E_a = 64061$  Дж/моль). Подобный метод может быть применен для определения константы  $k_{\mu}$ . Вязкость представляется как функция от степени отверждения  $\alpha$ , и  $k_{\mu}$  может быть легко вычислена. В отличие от некоторых связующих, термореактивные смолы при высоких температурах отверждаются быстро, с момента начала реакции. В связи с этим, представляется сложным начинать и останавливать реакцию смолы. Чтобы не повредить лабораторное оборудование, эти эксперименты не проводили. Обзор литературы показал, что для эпоксидной смолы принимается  $k_{\mu} = 45$  [78, 111]. Это значение было использовано в настоящей работе. На рисунке 4.21 показаны графики изменения вязкости для трех температур в зависимости от степени отверждения согласно (4.5).

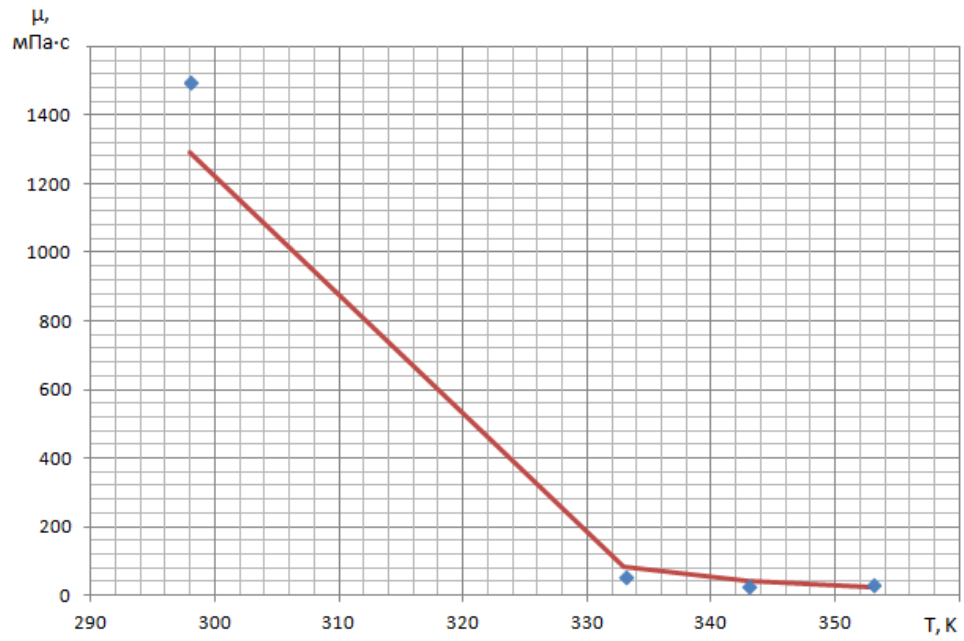


Рисунок 4.20 – График зависимости начальной вязкости от температуры. Точками показаны экспериментальные значения.

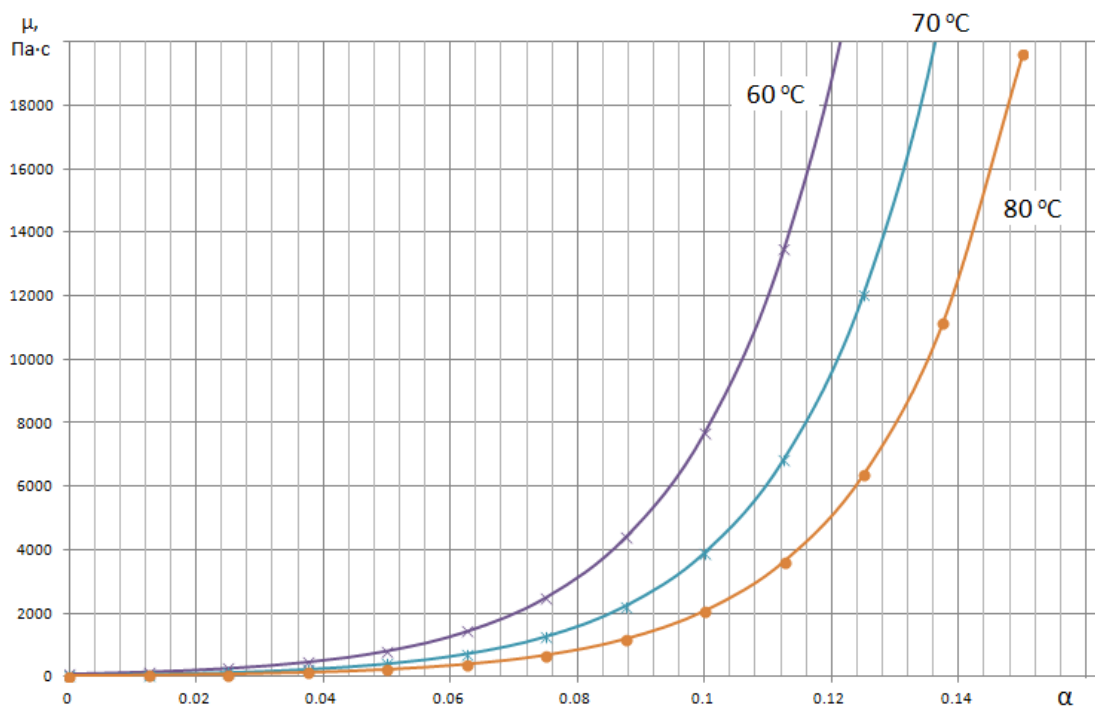


Рисунок 4.21 – Зависимость вязкости от степени отверждения для трех температур.

#### 4.4 Определение напряженно-деформированного состояния стержней и труб малого диаметра при пултрузии

В процессе изготовления методом пултрузии стеклопластиковых стержней и труб диаметром 16 и 32 мм соответственно потребовалось установить причину образования дефекта поверхности (рисунок 4.22). С этой целью выполнено математическое моделирование процесса пултрузии по определению напряженно-деформированного состояния материала.



Рисунок 4.22 – Дефект поверхности (шерховатость) пултрузионных стеклопластиковых стержней и труб, полученных на основе смолы Epotec 680

В таблице 4.4 приведены значения параметров математической модели, необходимые для решения задачи. В таблице 4.5 показаны прочностные свойства композиционного материала, используемые в математической модели.

Таблица 4.4 – Параметры математической модели

Параметр	Значение
Плотность связующего, г/см <sup>3</sup>	1.11
Плотность отвердевшего связующего, г/см <sup>3</sup>	1.27
Удельная теплоемкость неотвержденного связующего, Дж/(г·°С)	1.69
Коэффициент теплопроводности связующего, Вт/(м·°С)	0.25
Температура окружающего воздуха, °С	24
Температурный режим фильеры, °С	[190, 145]
Коэффициент трения между изделием и фильерой	0.3
Радиус фильеры, мм	8
Длина фильеры, м	1
Скорость пултрузии, см/мин.	15
Угол наклона конуса фильеры, град.	35
Длина конусного участка фильеры, мм	18
Усадка химическая, %	5
Коэффициент термического расширения связующего, 1/°С	$57.6 \cdot 10^{-6}$
Радиус элементарного волокна, м	$12 \cdot 10^{-6}$
Плотность стекловолокна, гр/см <sup>3</sup>	2.56
Удельная теплоемкость стекловолокна, Дж/(гр·°С)	0.84
Коэффициент теплопроводности стекловолокна, Вт/(м·°С)	1.1
Объемное содержание волокна	0.6
Коэффициент термического расширения стекловолокна, 1/°С	$5.04 \cdot 10^{-6}$

Таблица 4.5 – Прочностные свойства материала

Модуль упругости отвержд. связующего, МПа	3447
Модуль упругости неотвержд. связующего, МПа	3.447
Модуль упругости стекловолокна, МПа	73080
К-т Пуассона отвержденного связующего	0.35
К-т Пуассона стекловолокна	0.22

Ниже приводятся результаты моделирования пултрузии стеклопластикового стержня диаметром 16 мм с использованием программы пултрузии стержней, код которой представлен в приложении 4. На рисунке 4.23 показано распределение

температур внутри стержня внутри фильеры, на рисунке 4.24 – после выхода изделия из фильеры на участке 1 м.

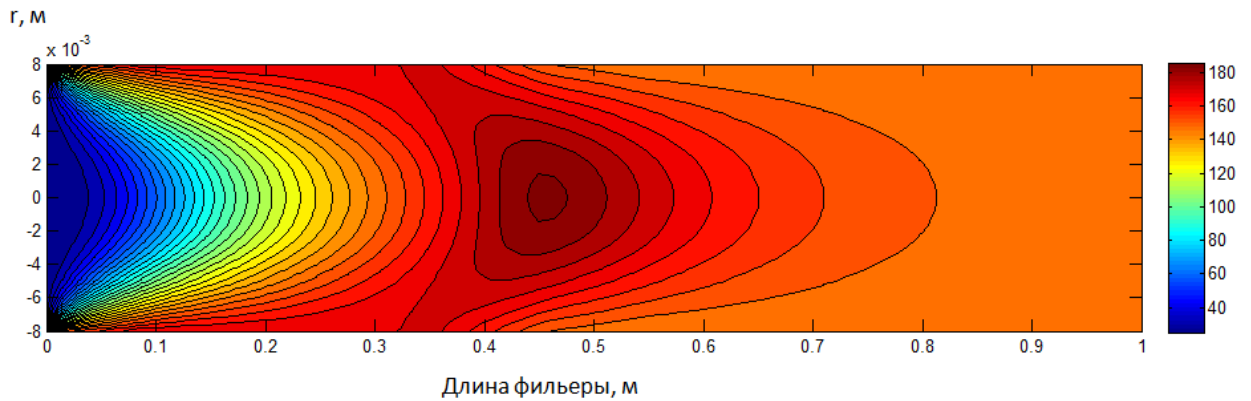


Рисунок 4.23 – Распределение температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) в изделии внутри фильеры

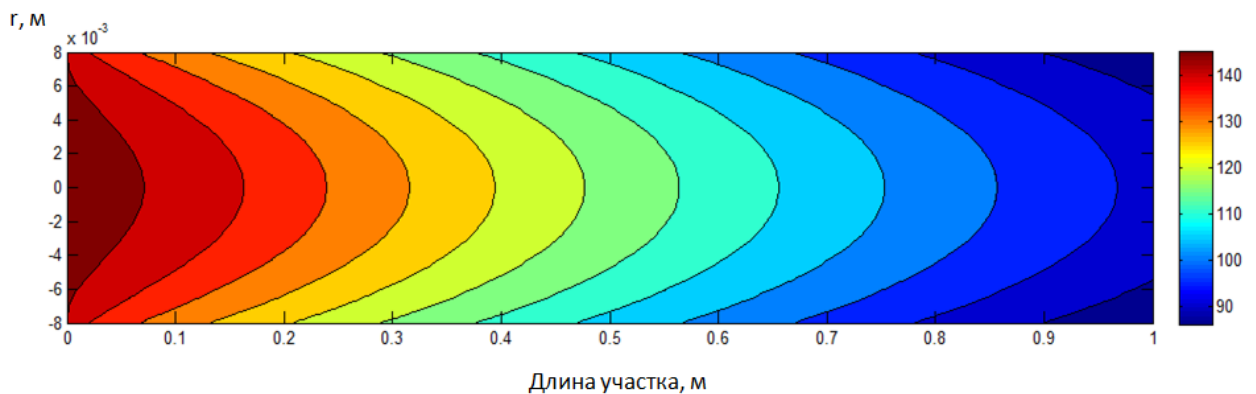


Рисунок 4.24 – Распределение температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) внутри стержня после выхода из фильеры

На рисунке 4.25 показано распределение степени отверждения связующего внутри стержня. Отверждение изделия полностью завершается внутри фильеры (степень отверждения не ниже 0.95).

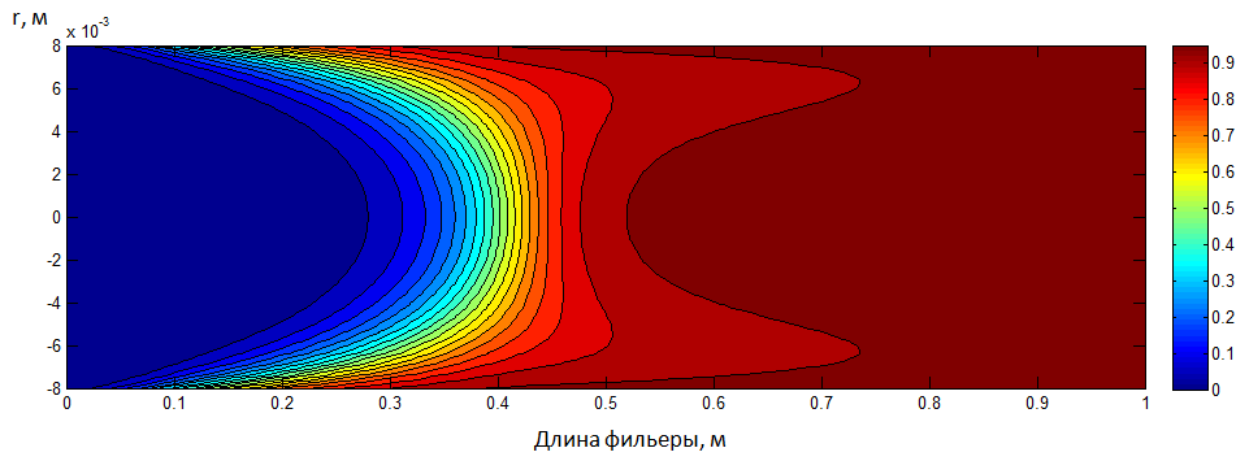


Рисунок 4.25 – Распределение степени отверждения связующего в изделии



На рисунке 4.26 показано поле перемещений в изделии после выхода из фильеры (показан участок длиной 5 м). Было определено, что наружная поверхность стержня после его остывания имеет перемещение  $-0.058$  мм. Таким образом, диаметр готового изделия после отверждения и остывания будет иметь диаметр  $15.88$  мм вследствие химической усадки связующего. Измерения серии образцов стержней показали, что диаметр стержня в среднем имеет величину  $15.8-15.9$  мм. Таким образом, полученные в результате моделирования результаты свидетельствуют о применимости учета химической усадки в математической модели.

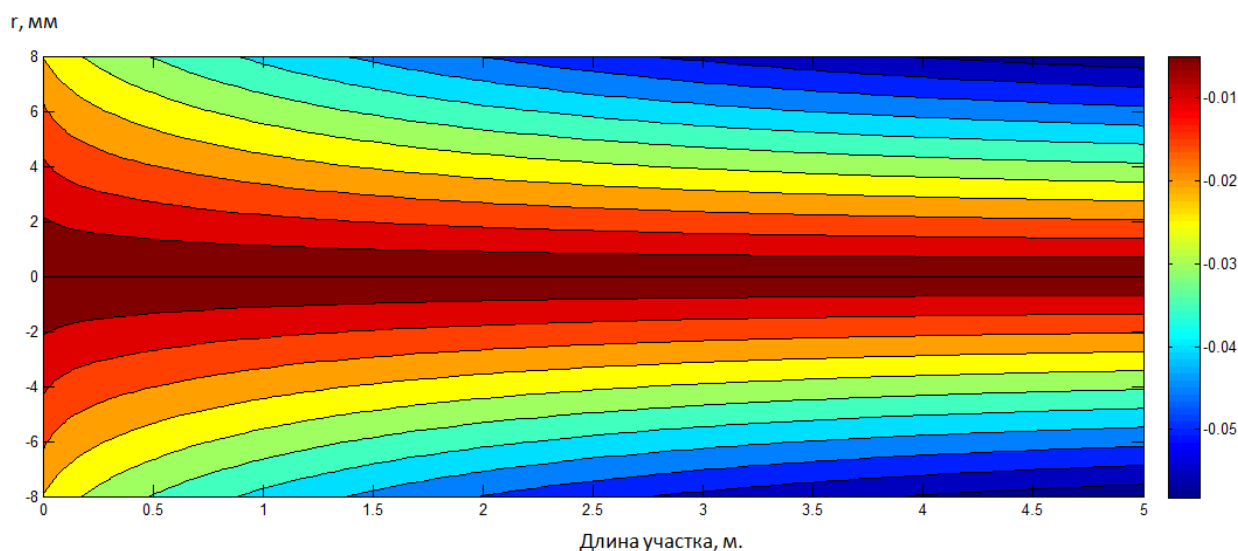


Рисунок 4.26 – Поле перемещений (мм) в изделии на участке после выхода из фильеры.

На рисунке 4.27 показано распределение радиальных напряжений в материале стержня внутри фильеры. На участке  $0.2-0.5$  м наблюдается концентрация значительных напряжений. Знак « $-$ » означает, что материал испытывает сжатие из-за теплового расширения и его ограничения стенкой фильеры. Вследствие этого происходит прилипание неотвержденной фазы материала к стенкам фильеры и ее последующий отрыв, что является причиной образования дефекта поверхности (рисунок 4.22). В пользу такого предположения говорит тот факт, что при увеличении скорости пултрузии до  $25$  см/мин (с одновременным увеличением температуры фильеры) математическая модель

показывает уменьшение напряжений (рисунок 4.28), а качество поверхности изделия значительно улучшается (рисунок 4.29).

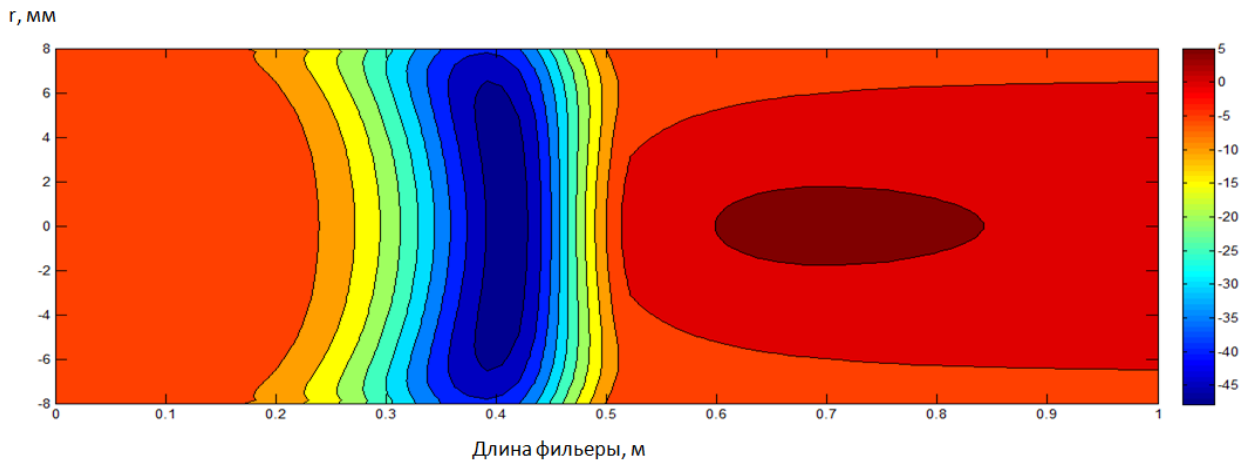


Рисунок 4.27 – Распределение радиальных напряжений (МПа) в материале стержня внутри фильеры.

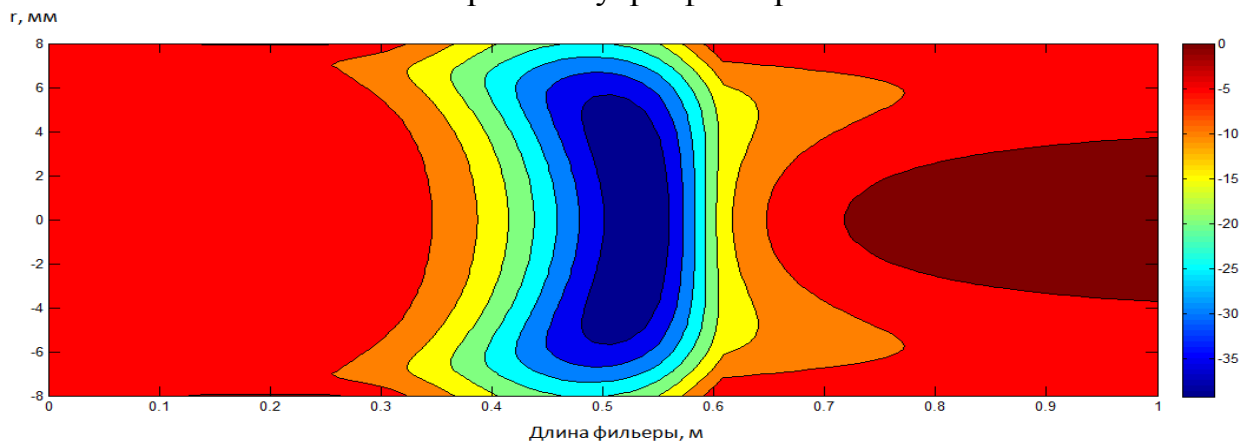


Рисунок 4.28 – Распределение радиальных напряжений (МПа) в материале стержня внутри фильеры при увеличении скорости пултрusion и температуры фильеры.



Рисунок 4.29 – Улучшение качества поверхности стержня при изменении скорости пултрusion и температуры фильеры.

На рисунке 4.30 показан пример распределения радиальных напряжений в материале трубы диаметром 32 мм и внутренним диаметром 24 мм при скорости пултрузии 25 см/мин и температурным режимом фильеры [150, 170] °С.

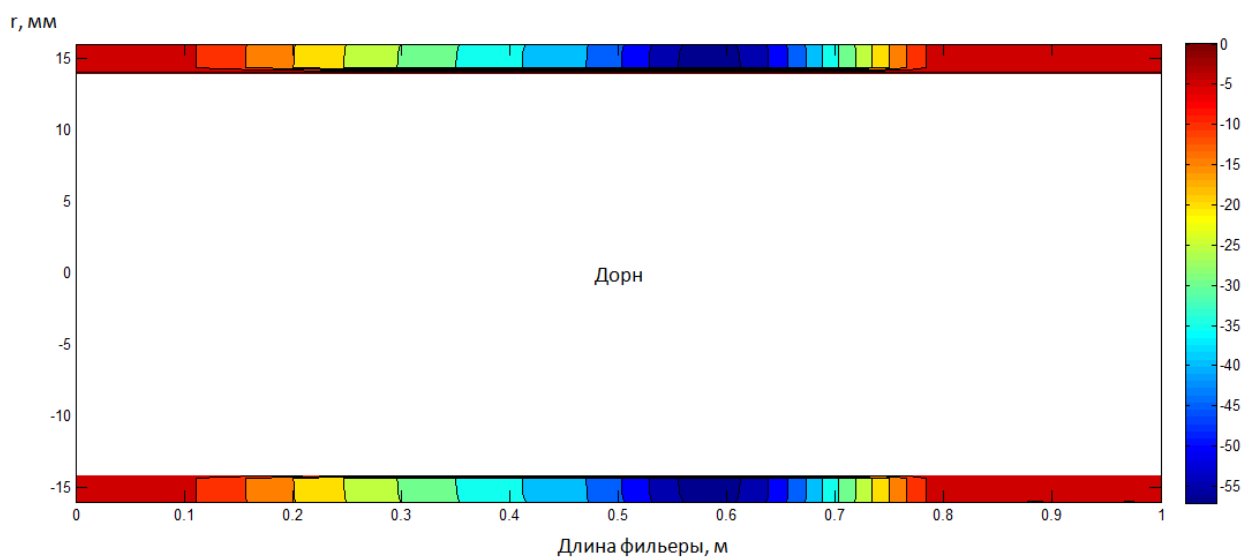


Рисунок 4.30 – Распределение радиальных напряжений (МПа) в материале трубы внутри фильеры

Радиальные напряжения распределены по всей толщине стенки трубы и присутствуют как на внешней, так и на внутренней поверхностях трубы. Величину этих напряжений необходимо контролировать и стремиться к их понижению, с целью не допустить образования некачественных поверхностей (рисунок 4.31). Результаты проделанной работы были внедрены на производственном предприятии ООО «НЦК», что отражено в акте о внедрении №2 (см. приложение 1).



Рисунок 4.31 – Образование некачественных внутренних и внешних поверхностей стеклопластиковой трубы

#### 4.5 Определение напряженно-деформированного состояния стержней большого диаметра при пултрузии

Пултрузия стержней, диаметр которых превышает 50 мм, имеет ряд особенностей. Прежде всего, из-за низкой теплопроводности композиционного материала для полного прогрева сечения стержня до необходимой температуры требуется больше времени, а следовательно, скорость пултрузии таких стержней достаточно мала [23]. Если повышать температуру нагревателей, то происходит резкий рост температуры внутри стержня, поскольку в результате отверждения выделяется большое количество тепла. Это тепло не успевает отводиться от центра стержня к его поверхности, вызывая деструкцию материала. Для повышения производительности процесса скорость пултрузии увеличивают так, чтобы процесс отверждения в центральной части стержня не заканчивался внутри фильеры, а выходил за нее. Однако при повышении скорости пултрузии на поверхности стержня появляются магистральные трещины, образование которых происходит за счет действия усадочных и температурных напряжений (рисунок 4.32).

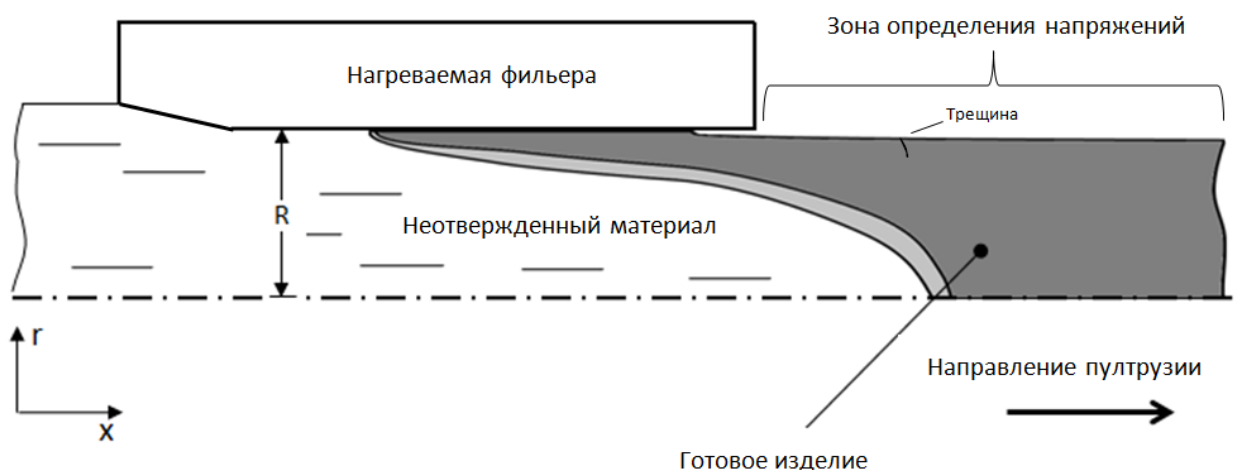


Рисунок 4.32 – Образование магистральной трещины в стержне большого диаметра

Для определения механизма образования трещин и места локализации максимальных напряжений было выполнено математическое моделирование пултрузии стержня диаметром 76 мм из эпоксидного стеклопластика на основе

связующего №1. Параметры температурно-скоростного режима пултрузии показаны в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Параметры температурно-скоростного режима пултрузии

Параметр	Значение
Скорость пултрузии, см/мин.	5 и 6
Длина фильеры, м	1
Температурный режим на фильере (2 секции), °С	[150;190]
Температура материала при входе в фильеру, °С	50
Температура окружающей среды, °С	25

На рисунках ниже представлены результаты расчета математической модели на участке выхода стержня из фильеры.

На рисунке 4.33 показано распределение температур внутри стержня. Видно, что центральная часть стержня на участке 0.28-0.42 м от выхода из фильеры имеет максимальную температуру 180 °С. Верхние слои стержня при этом начинают терять температуру (остывать) на окружающем воздухе.

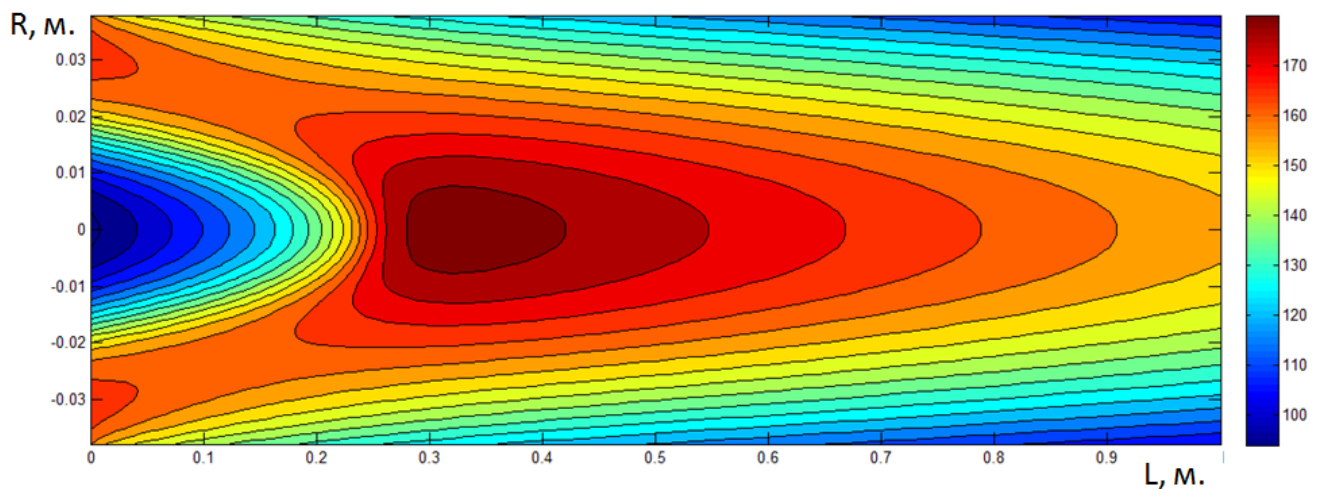


Рисунок 4.33 – Распределение температур (°С) внутри стержня после выхода из фильеры при скорости пултрузии 5 см/мин.

На рисунке 4.34 показано распределение степени отверждения связующего внутри стержня. Отверждение изделия полностью завершается на расстоянии 0.36 м от выхода из фильеры.

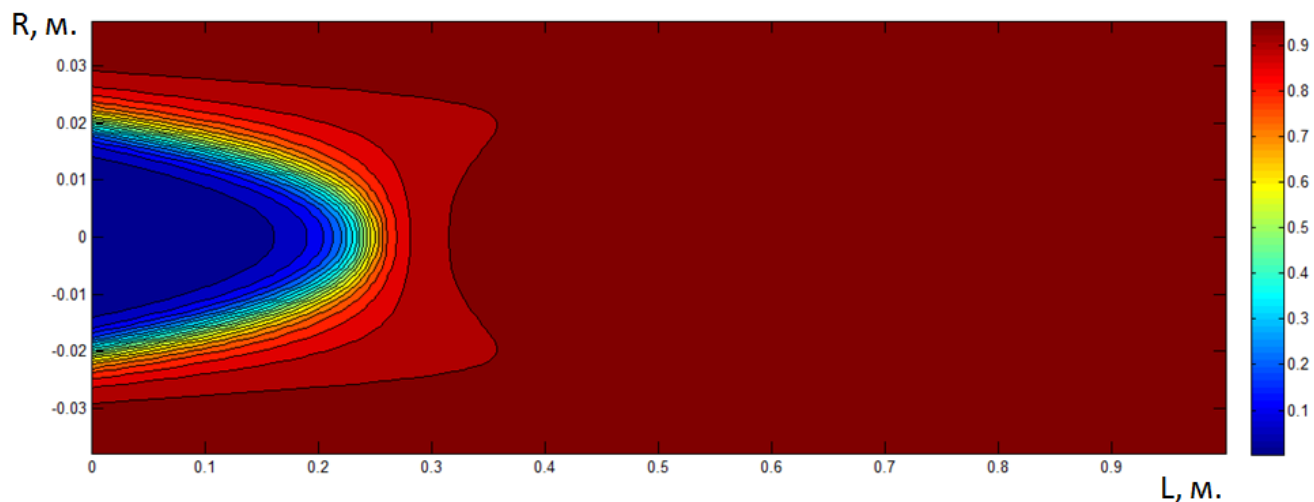


Рисунок 4.34 – Распределение степени отверждения связующего внутри стержня после выхода из фильеры при скорости пултрязии 5 см/мин.

На рисунке 4.35 показано поле перемещений точек внутри стержня. Вблизи фильеры перемещения близки к нулю, по мере остывания диаметр стержня уменьшается из-за наличия химической усадки.

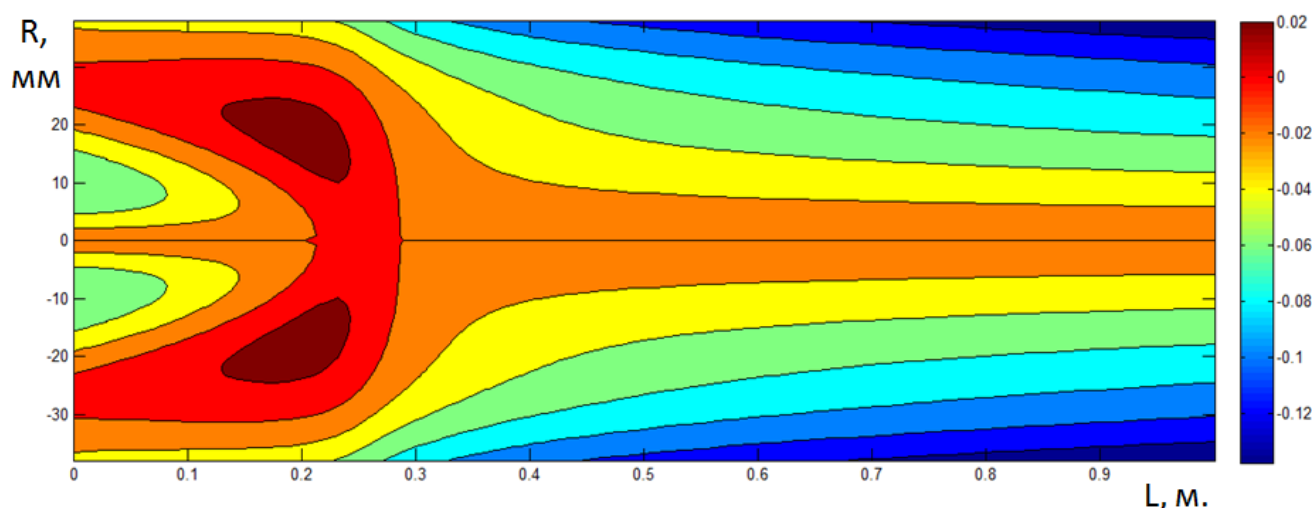


Рисунок 4.35 – Поле перемещений (мм) внутри стержня после выхода из фильеры при скорости пултрязии 5 см/мин.

На рисунке 4.36 показано распределение радиальных напряжений внутри стержня. На поверхности стержня радиальные напряжения близки к нулю, что свидетельствует о выполнении граничного условия (3.157). Результаты показывают наличие больших сжимающих напряжений в центре стержня вблизи вершины конуса, образуемого неотвердевшим связующим (см. рисунок 4.34).

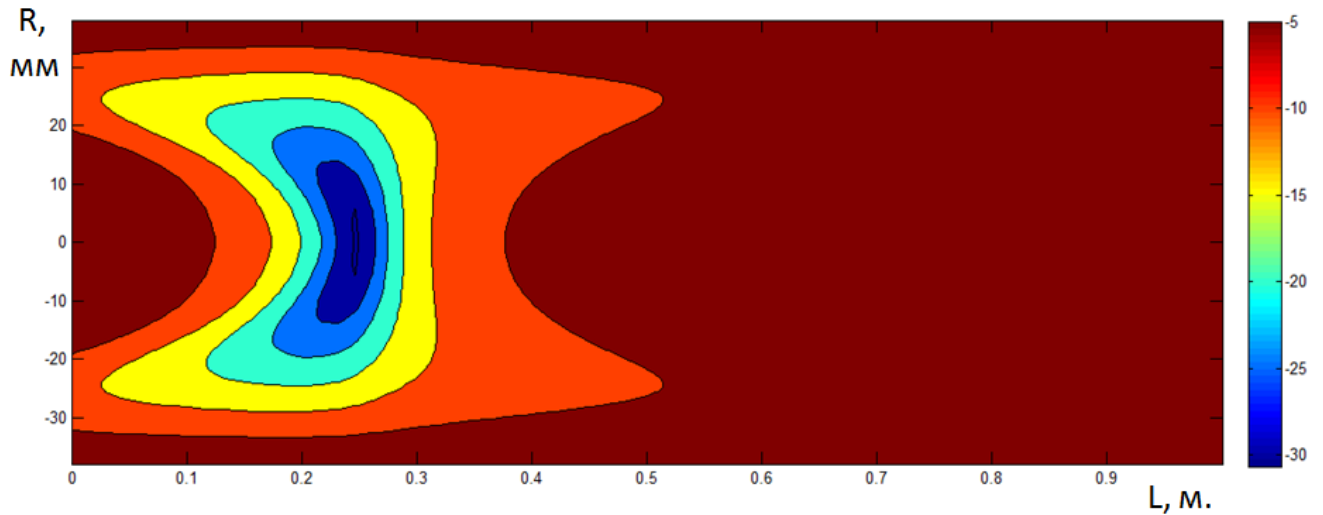


Рисунок 4.36 – Распределение радиальных напряжений (МПа) внутри стержня после выхода из фильеры при скорости пултрузии 5 см/мин.

На рисунке 4.37 показано распределение окружных напряжений внутри стержня. На поверхности стержня окружные напряжения имеют максимальные значения. При скорости пултрузии 5 см/мин для данной задачи они не превышают 35 МПа. В зоне желатинизации (показано синим цветом) отверждение связующего происходит наиболее интенсивно, что означает более интенсивный процесс химической усадки. Поэтому в такой зоне возникают наибольшие сжимающие напряжения.

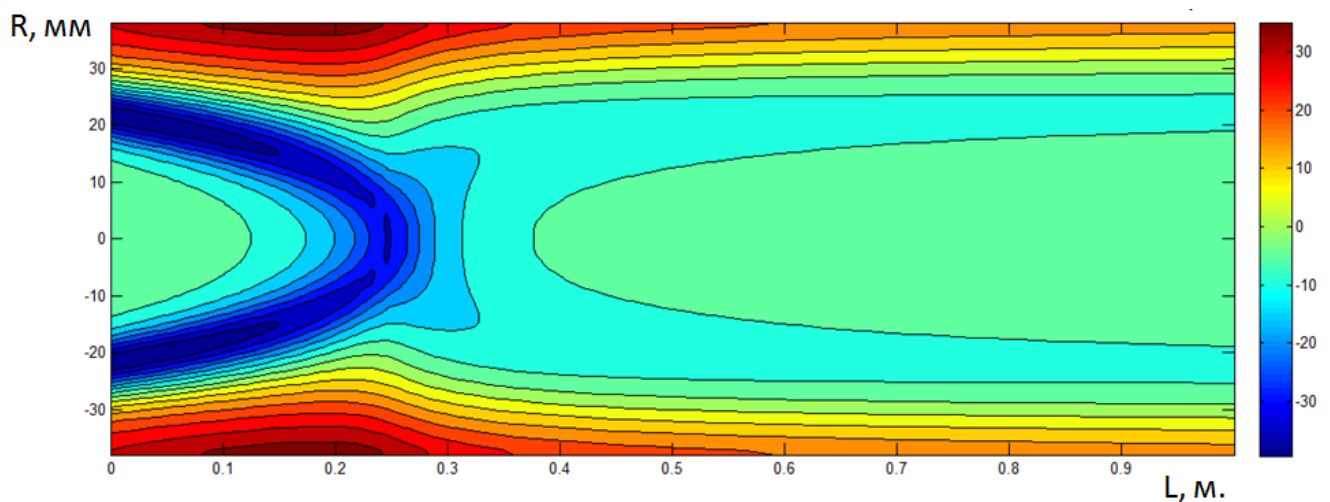


Рисунок 4.37 – Распределение окружных напряжений (МПа) внутри стержня после выхода из фильеры при скорости пултрузии 5 см/мин.

При увеличении скорости пултрузии до 6 см/мин окружные напряжения на поверхности стержня (рисунок 4.38) достигают предельных значений (47 МПа).

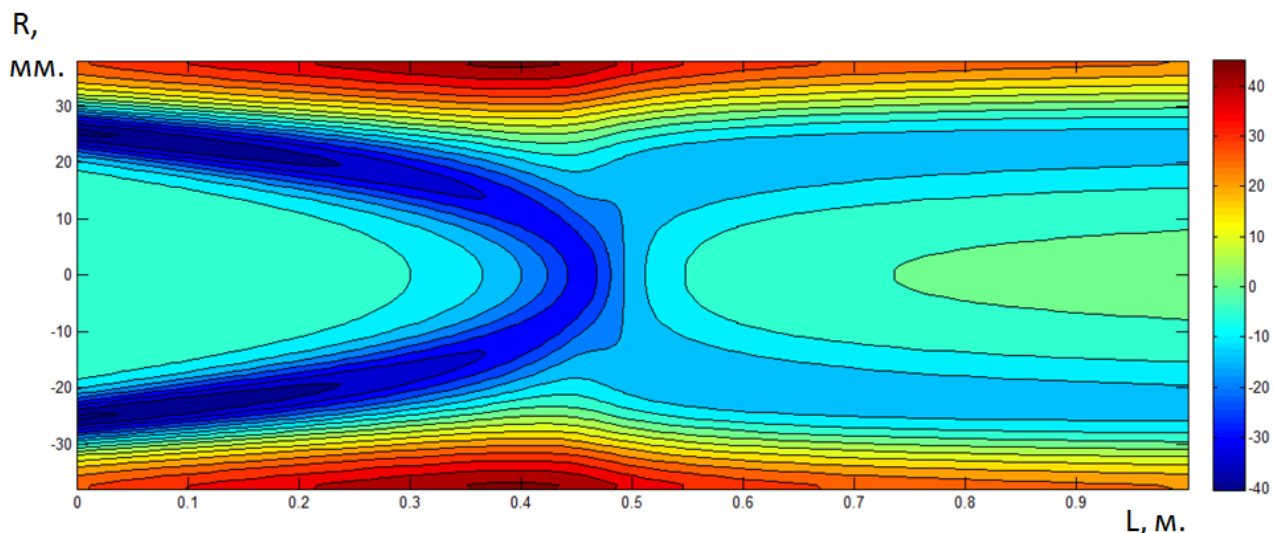


Рисунок 4.38 – Распределение окружных напряжений (МПа) внутри стержня после выхода из фильеры при скорости пултрузии 6 см/мин.

При достижении окружными напряжениями значения 47 МПа происходит образование магистральной трещины, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе [43]. При наличии несплошностей и пузырьков воздуха внутри отвердевшего связующего возможно снижение допускаемых напряжений менее 47 МПа, что приводит к более раннему формированию трещины. Установлено, что опасные максимальные окружные напряжения на поверхности стержней диаметром 50-80 мм возникают на расстоянии 60-250 мм от фильеры в зависимости от скорости пултрузии и температурного режима. Высокие окружные напряжения на поверхности стержня возникают немного ранее вершины конуса, образуемого неотвердевшим связующим из-за наиболее неблагоприятной концентрации температурных напряжений и напряжений, возникающих из-за химической усадки материала, в одном из сечений стержня.



## 5 Оптимизация технологического процесса пултрузии

### 5.1 Постановка задачи оптимизации

Под оптимизацией технологического процесса пултрузии принято понимать такое назначение технологических параметров процесса, при котором он будет наилучшим из всех возможных вариантов. Проблеме оптимизации посвящено большое число работ [2, 8-10, 20, 41, 100], однако применительно к процессу пултрузии число таких работ незначительно [4, 26, 43]. Интерес к исследованиям в области оптимизации процесса пултрузии постоянно растет в условиях конкуренции в связи с возможностями увеличения производительности процесса и снижения себестоимости композитного изделия.

В оптимизации можно выделить несколько следующих этапов, которые необходимо пройти [20]:

- Сформулировать задачу, включающую задание требований и целей, предъявляемых к процессу в целом;
- Построить математическую модель оптимизации;
- Найти решения с помощью построенной модели;
- Проанализировать решения и уточнить модель в случае необходимости.

Построение математической модели оптимизации включает в себя:

- Введение обозначений для варьируемых параметров;
- Задание критерия оптимальности (целевой функции, функционала), зависящего от варьируемых параметров;
- Выделение множества допустимых значений переменных, определяемого ограничениями, наложенными на варьируемые параметры.

Рассмотрим этапы формализации применительно к процессу пултрузии.

Варьируемые параметры, или проектные переменные, от которых зависит целевая функция, также называют параметрами управления или параметрами

оптимизации. К числу проектных параметров относятся: геометрические (конструктивные), физические и технологические параметры.

К геометрическим параметрам относятся: размеры производимых композиционных элементов, их число (например, при одновременном изготовлении композитной арматуры в несколько ручьев) и параметры, определяющие их тип; форма элементов; геометрические размеры фильеры и полимеризационной печи, в том числе габаритные; геометрические данные обмоточного устройства и т.д.

В качестве физических характеристик могут выступать: массовое и объемное содержание волокна в композите, реокинетические свойства связующего, модули упругости, плотности, прочности материала и др.;

Технологическими параметрами обычно являются: скорость пултрузии, температурный режим в полимеризационной печи или фильере, температура предварительного прогрева жгутов или связующего в ванне, частота вращения обмоточного устройства и др.

Варьируемые параметры принято представлять в виде вектора:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (5.1)$$

Поскольку процесс пултрузии является сложным технологическим процессом производства композиционных материалов, проблематично создать расчетную модель с полным учетом всех свойств реального процесса. Поэтому некоторые параметры реального процесса входят в математическую модель как неизменяемые, или неуправляемые. К числу неуправляемых параметров можно отнести объемное содержание волокна в конечном изделии, кинетические свойства связующего (если решение определяется только для одной рецептуры). Давление связующего во входной части фильеры можно отнести к управляемым параметрам, поскольку оно вычисляется в процессе решения задачи оптимизации.

В общем виде критерий оптимальности записывается в виде функционала:

$$C(x) = \Phi(f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), \quad (5.2)$$

где  $f_n(x)$  – некая функция от набора параметров, или критерий эффективности. Она позволяет количественно производить оценку эффективности проектных решений.

Наиболее распространенным критерием оптимальности является увеличение скорости пултрязии при минимизации расходов электроэнергии на нагрев фильеры и исключения образования дефектов композиционного материала.

Кроме критериев качества, оптимизация которых является целью решения задачи оптимизации процесса пултрязии, к процессу могут предъявляться дополнительные требования. Это ограничения, накладываемые на проектные параметры, которые записываются в форме равенств или неравенств. Например, максимальная температура нагрева фильеры ограничена как конструктивными возможностями, так и некоторым предельным значением, при превышении которого начинается процесс разрушения композиционного материала (образование мелких трещин, горение). С другой стороны, для процесса пултрязии температура первых участков полимеризационной печи не должна быть ниже определенного значения, поскольку при низкой вязкости связующего происходит т.н. процесс каплевыпадения, композиционный стержень получается с наплывами, теряет свое качество и внешний вид.

При изготовлении крупногабаритных стержней методом пултрязии одним из самых важных критериев качества является условие прочности, при нарушении которого в изделии после его выхода из фильеры образуются магистральные трещины:

$$|\sigma_{i,j}| \leq \overline{\sigma_{i,j}}, \quad (5.3)$$

где  $\sigma_{i,j}$  – компоненты напряжений композиционного материала,  $\overline{\sigma_{i,j}}$  – предельные допустимые напряжения.

Система (5.2), для которой будут выполняться все условия, записанные в форме ограничений, выраженных в виде равенств или неравенств, называется работоспособной. Решения, которые удовлетворяют всем заданным

ограничениям, называются допустимыми. Из допустимых выбирается оптимальное решение.

## 5.2 Оптимизация температурно-скоростного режима

### 5.2.1 Определение оптимального температурно-скоростного режима для пултрузии

В качестве примера решения задачи оптимизации температурно-скоростного режима процесса формования стержней методом пултрузии был рассмотрен процесс изготовления стержня диаметром 16 мм. Критерием оптимальности являлось увеличение скорости пултрузии при исключении образования дефектов композиционного материала (задача минимизации напряжений на поверхности стержня внутри фильеры). В качестве параметров управления выступали: скорость пултрузии, температурный режим фильеры. Ограничением, накладываемым на температурный режим, являлось непревышение температуры материала величины порядка  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также требование завершенности процесса отверждения материала до выхода из фильеры.

На рисунке 5.1 показано расположение нагревателей на фильере. Длина фильеры – 1 м. Можно выделить две зоны нагрева фильеры – первую, расположенную ближе ко входу пропитанных связующим волокон в фильеру, и вторую – ближе к выходу изделия из фильеры.



Рисунок 5.1 – Расположение нагревателей на фильере

Температура для первой и второй зон фильеры задается независимо друг от друга при помощи программного модуля установки пултрузии. Температура материала при входе в фильеру не изменялась, и приравнивалась к температуре помещения, в котором проводились эксперименты (24 °С).

Ниже приведены результаты решения задачи оптимизации изготовления стержня при различных вариантах температурно-скоростного режима пултрузии. Код программы, используемой для оптимизации процесса пултрузии, представлен в приложении 4.

Ниже представлены следующие ограничения, накладываемые на результаты расчетов:

1. Завершенность отверждения изделия до его выхода из фильеры (степень отверждения не ниже 0.95);
2. Температура материала не выше 250 °С;
3. Радиальные напряжения на поверхности стержня внутри фильеры не выше 30 МПа (раздел 4.4).

В таблице 5.1 показаны результаты расчета оптимизации температурно-скоростного режима пултрузии.

Таблица 5.1 – Результаты оптимизации пултрузии стержня диаметром 16 мм

№	Температура, °С		Скорость, м/мин				
	Зона I	Зона II	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
1	150	150	3	1,3	1,3	1,3	1,3
2	150	160	3	3	1,3	1,3	1,3
3	150	170	3	3	3	1,3	1,3
4	150	180	3	3	3	3	3
5	160	170	3	3	3	3	1,3
6	170	160	3	3	3	1,3	1,3
7	180	170	+	+	+	3	3
8	180	160	+	+	+	3	1,3
9	180	155	+	+	+	+	1,3
10	180	150	+	+	+	1	1,3
11	180	140	+	+	+	1	1,3

Цифрами 1, 2, 3 соответственно обозначено неудовлетворение указанных выше ограничений, знаком «+» отмечено удовлетворение всем критериям.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что наиболее оптимальным является режим № 9. В этом случае достигается максимальная скорость пултрузии (0.25 м/мин) без потери качества изделия. Необходимо отметить тот факт, что для используемого связующего на основе смолы EPOTEC YDL 680 необходимо увеличить температуру первой секции фильеры до максимально возможного, чтобы получить изделие с хорошим качеством поверхности. При этом для достижения скорости пултрузии 0.25 м/мин температура второй секции должна быть порядка 155 °С. При температуре второй секции фильеры, выше указанной, качество поверхности стержня ухудшается, а при более низкой температуре изделие не успевает отвердиться до выхода из фильеры. Полученный оптимальный температурно-скоростной режим сложно установить в заводских условиях без использования математического моделирования процесса.

Результаты работы были внедрены на производственном предприятии ООО «НЦК», что отражено в акте о внедрении №2 (см. приложение 1).

### **5.2.2 Определение оптимального температурно-скоростного режима для безфильерного способа формования стержней**

В качестве примера построения математической задачи оптимизации температурно-скоростного режима безфильерного процесса формования стержней (нидлтрузии) был рассмотрен процесс изготовления стержня диаметром 8 мм. При этом использовались параметры математической модели, приведенные в разделе 4.1. В математической модели могут меняться следующие параметры: скорость пултрузии, радиус стержня, температура материала на входе в полимеризационную печь, общая длина печи полимеризации, количество секций печи полимеризации и некоторые свойства материалов. В качестве критерия оптимальности рассматривается условие получения качественного изделия (соответствия ГОСТ 31938-2011 от 1 января 2014 г. на композитную арматуру) при максимально возможной температуре в печи 350 °С.

Оптимальные решения определялись при условиях начальной температуры связующего  $+24^{\circ}\text{C}$  и  $+50^{\circ}\text{C}$ . Ниже приведены результаты решения задачи оптимизации процесса изготовления стержня при равномерном изменении заданной температуры печи одновременно на всех участках. При этом на результаты расчетов вводились следующие ограничения:

- Завершенность отверждения изделия до его выхода из полимеризационной печи (степень отверждения не ниже 0.95);
- Температура материала не выше  $250^{\circ}\text{C}$ .

В ходе решения задачи оптимизации определялась область допустимых заданных температур секций печи и скоростей нидлтризии для вышеупомянутой композиции связующего №2. Температурный режим на всех участках печи полимеризации менялся от 0 до  $350^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 5.2 представлен пример расчета области допустимых температур секций печи и скоростей протяжки. Точки заштрихованной области соответствуют температурно-скоростному режиму, при котором удовлетворяются все критерии качества. Заштрихованная область означает удовлетворение всем критериям качества. Для области, расположенной выше верхней границы криволинейного треугольника, не выполняется критерий завершенности процесса отверждения на выходе из печи полимеризации. Для области, расположенной справа от боковой границы криволинейного треугольника, не выполняется критерий №2.

Однако, в процессе эксперимента выявилось такое явление, как каплевыпадение – при недостаточно высоких температурах, если отверждение связующего не происходит достаточно быстро, низковязкое связующее начинает образовывать капли (рисунок 5.3 В). Композиционный стержень получается с наплывами, теряет свое качество и внешний вид. Эксперименты показали, что для получения качественного изделия необходимо ввести дополнительное ограничение на величину начальной температуры на первых двух участках полимеризационной печи – она должна быть не ниже  $250^{\circ}\text{C}$ .

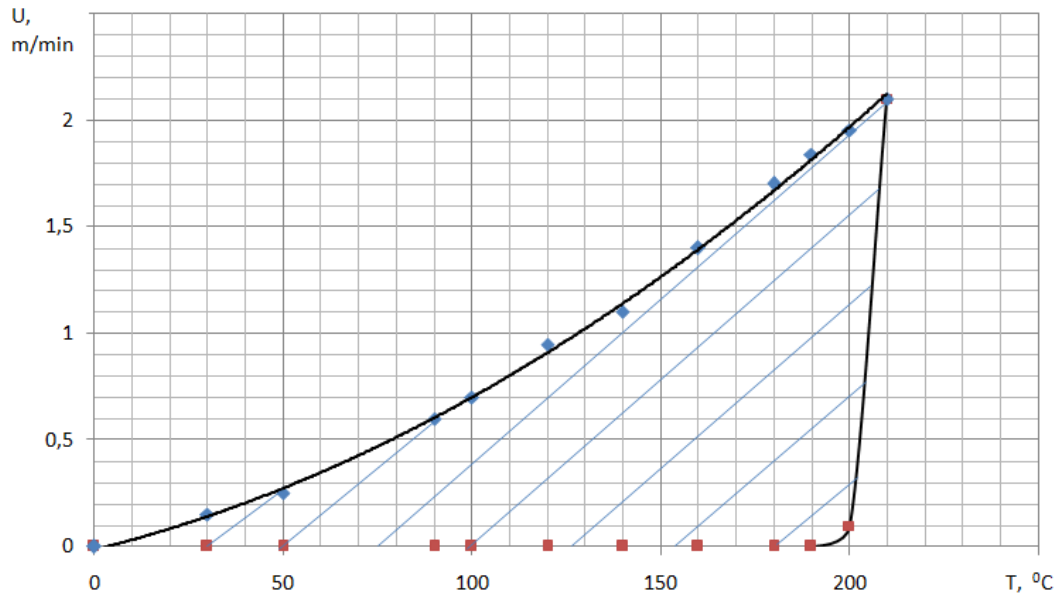


Рисунок 5.2 – Область допустимых заданных температур печи и скоростей пултрusion для стержня диаметром 8 мм из эпоксидного стеклопластика

Для того, чтобы выполнялся критерий №2, в третьей и последующей зонах печи с помощью программы по моделированию безфильерного процесса изготовления стержней подбирались определенные температуры. Таким образом, был определен оптимальный температурный режим получения стержня:  $TF=[310,350,250,250,210,160,150,150]$ . При этом скорость пултрusion составила 3 м/мин.

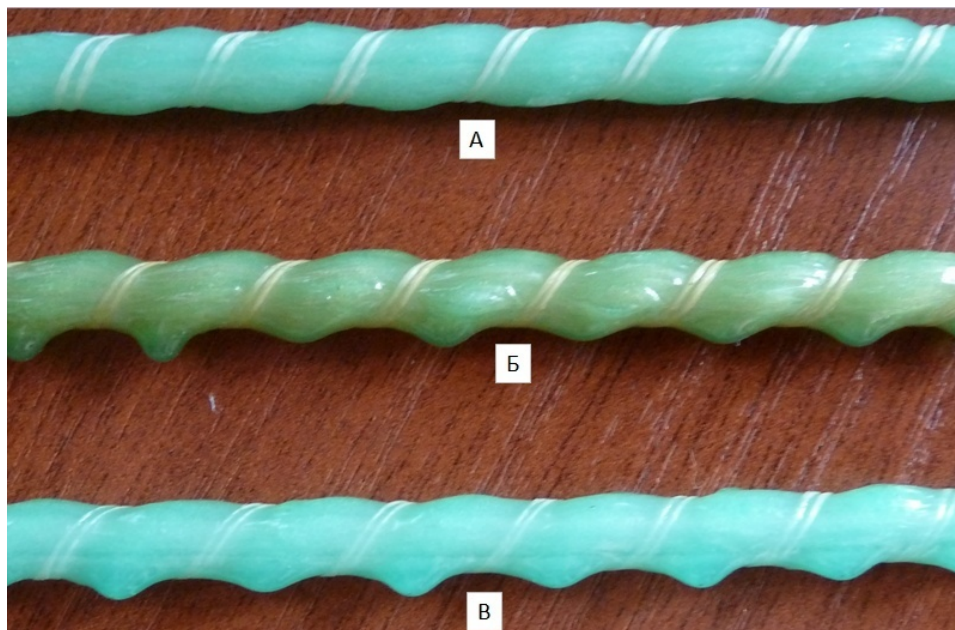


Рисунок 5.3 – Образцы изготовленных методом пултрusion стержней: А – изделие нормального качества, Б – образец с признаками каплевыпадения и деструкции материала, В – образец с признаком каплевыпадения



На рисунке 5.4 показан график изменения температур вдоль центральной оси стержня, а на рисунке 5.5 – на его поверхности.

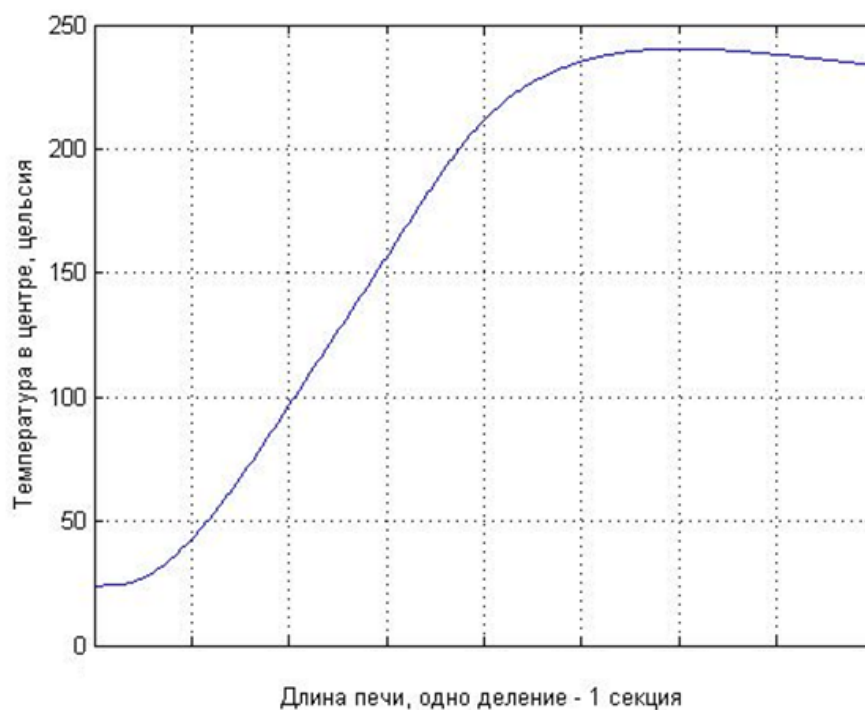


Рисунок 5.4 – График изменения температуры вдоль оси стержня

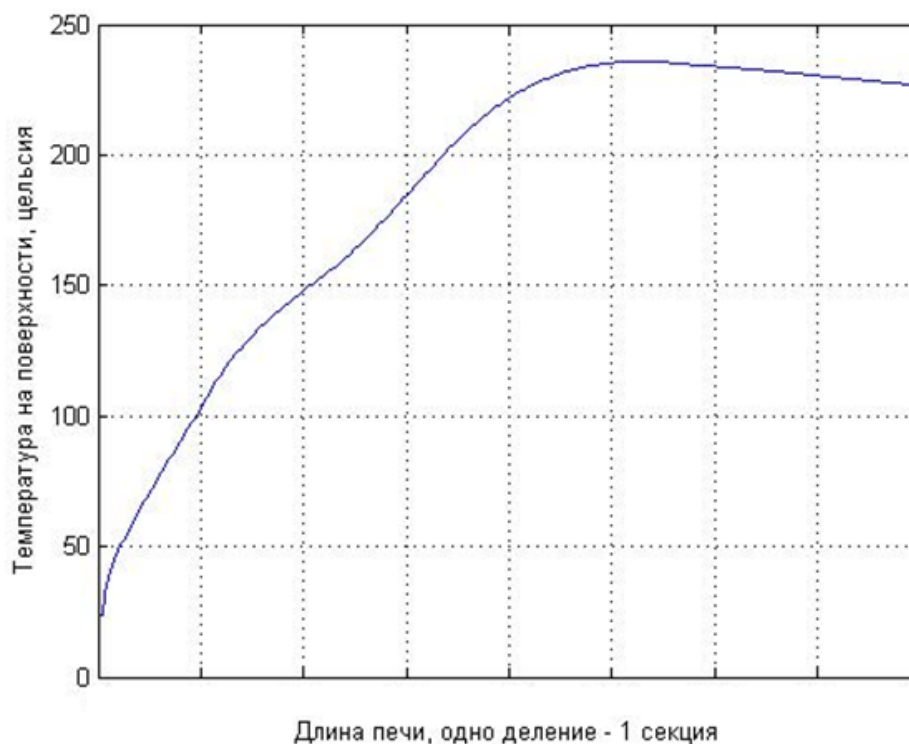


Рисунок 5.5 – График изменения температуры на поверхности стержня

На рисунке 5.6 показано изменение степени отверждения связующего вдоль центральной оси стержня для оптимального режима.

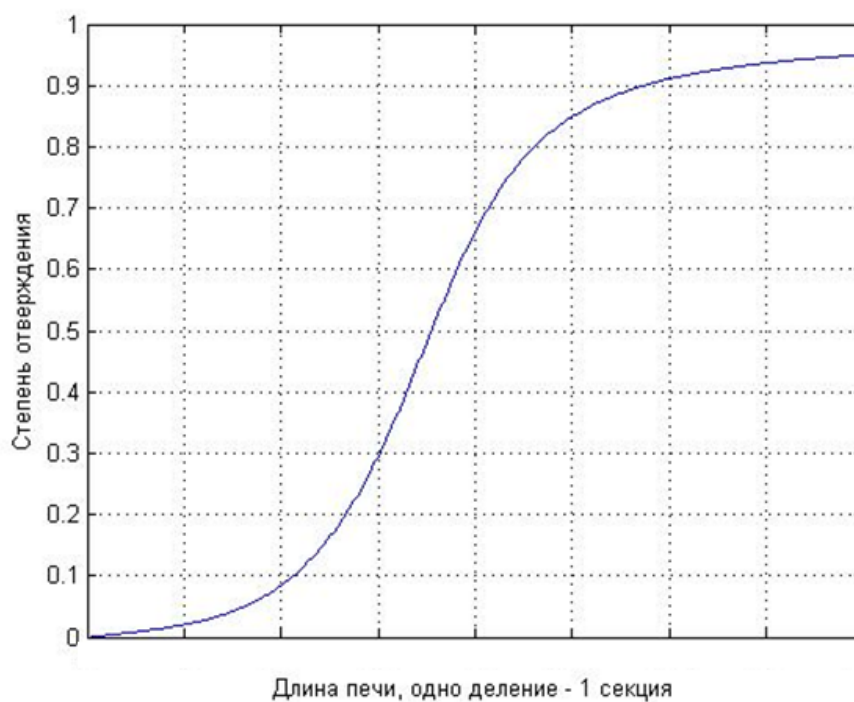


Рисунок 5.6 – График изменения степени отверждения связующего вдоль центральной оси стержня

На рисунке 5.7 изображены температурное поле продольного среза стержня (вверху) и распределение степени отверждения связующего (внизу). Секущей плоскостью является любая плоскость симметрии стержня.

R, м

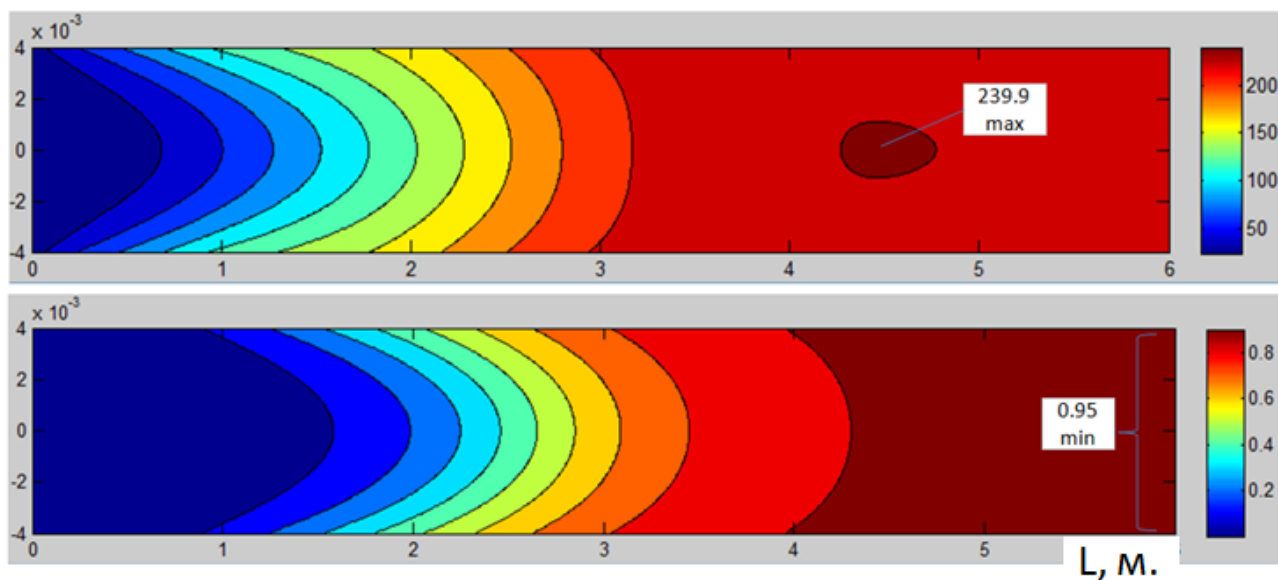


Рисунок 5.7 – Температурное поле и распределение степени отверждения связующего внутри стержня

Обычно связующее приготавливается путем смешивания компонент при определенной температуре, например, при 40 или 50 °С. Нередко температуру материала перед подачей в полимеризационную печь также повышают с помощью подогрева ровинга. При условии начальной температуры связующего +50 °С результат оптимизации для заданной температуры печи при неизменной скорости пултрузии меняется (таблица 5.2, опыт № 2).

Таблица 5.2 – Результаты оптимизации пултрузии стержня диаметром 8 мм

№ Опы- та	Температура материала на входе в печь, °С	Заданная температура, °С	Скорость пултрузии, м/мин
1	24	TF=[310,350,250,250,210,160,150,150]	3
2	50	TF=[310,310,230,230,210,160,150,150]	3
3	50	TF=[350,350,220,180,220,190,180,190]	3.3

Сравнивая результаты №1 и №2 можно увидеть, что предварительный подогрев материала способствует снижению энергозатрат на обогрев 1 и 2 секций полимеризационной печи. Если энергозатраты для предварительного обогрева материала будут меньше, чем энергозатраты дополнительного повышения температуры в полимеризационной печи, то результат оптимизации, представленный во второй строке таблицы 5.2, будет более предпочтительным. В третьей строке таблицы представлен результат оптимизации без ограничений на скорость протяжки. Из результата видно, что предварительный подогрев материала способствует увеличению скорости протяжки, однако при этом возрастают энергозатраты как на предварительный нагрев материала, так и на дополнительное повышение температуры в полимеризационной печи.

Результаты по оптимизации температурно-скоростного режима безфильтрного способа изготовления стержней показали следующие особенности процесса:

- 1) Для выполнения условия получения качественного изделия на результаты расчетов необходимо вводить следующие ограничения:

- Завершенность процедуры отверждения в процессе изготовления изделия до его выхода из полимеризационной печи;
- Отсутствие температурной деструкции материала;
- Отсутствие каплевыпадения.

Технологический процесс считается непригодным, если хотя бы один из критериев не выполняется.

2) Температурный режим печи полимеризации является своего рода уникальным по отношению к скорости пултрузии стержня. Например, температурный режим, полученный для скорости пултрузии 3 м/мин может быть непригодным для пултрузии стержня с меньшей скоростью, поскольку в таком случае будет наблюдаться невыполнение критерия оптимальности №2 (отсутствие температурной деструкции). И наоборот, при увеличении скорости пултрузии не будет выполняться критерий №1 (Завершенность процедуры отверждения).

3) Без использования математической модели экспериментальный подбор температурных режимов представляет собой довольно сложную задачу, выполнение которой сопровождается большими затратами времени, расходом электроэнергии и материалов.

Полученный оптимальный режим протяжки композитной арматуры был внедрен на производственном предприятии ООО «Машспецстрой», что отражено в акте о внедрении №1 (см. приложение 1).

### **5.3 Оптимизация геометрии конусного участка фильеры**

#### **5.3.1 Пример оптимизации геометрии конусного участка фильеры для стержня большого диаметра**

Среди различных подходов к улучшению качества композитных изделий одним из наиболее важных является повышение давления связующего во входном участке фильеры. Повышение давления способствует улучшению пропитки волокон связующим и уменьшает пористость готовых изделий. Конструктивные параметры входного участка фильеры должны обеспечивать максимальное

давление в фильере для получения изделий высокого качества. В настоящем разделе приводятся результаты оптимизации конструктивных параметров входного участка фильеры на основе разработанной математической модели (подробное описание приведено в разделе 3.2.1) для крупногабаритного стержня диаметром 80 мм.

На рисунке 5.8 показан процесс прохождения системы волокно/связующее через конический участок фильеры (ввиду симметрии изображена верхняя половина). Верхняя точка, где происходит контакт системы волокно/связующее со стенкой фильеры, называется точкой пересечения. Вследствие уменьшения входного радиуса  $R_p$  до радиуса прямого участка фильеры  $R_s$  (радиус готового изделия) происходит определенное увеличение давления связующего внутри конического участка фильеры. На практике радиус  $R_p$  задается специальной формирующей пластиной, а отношение  $R_p/R_s$  обычно находится в диапазоне 1.02...1.25. Это отношение является параметром управления для поставленной задачи оптимизации, а указанный выше диапазон – его ограничением.

Угол  $\alpha$  (рисунок 5.8) линейного профиля входной части фильеры является параметром управления. Нижняя граница для него определяется из условия

$$(a-1)\frac{R_s}{L_k} = \operatorname{tg}\alpha, \quad (5.4)$$

где  $a=R_p/R_s$ ,  $L_k=b\cdot R_s=L_1+L_2$ .

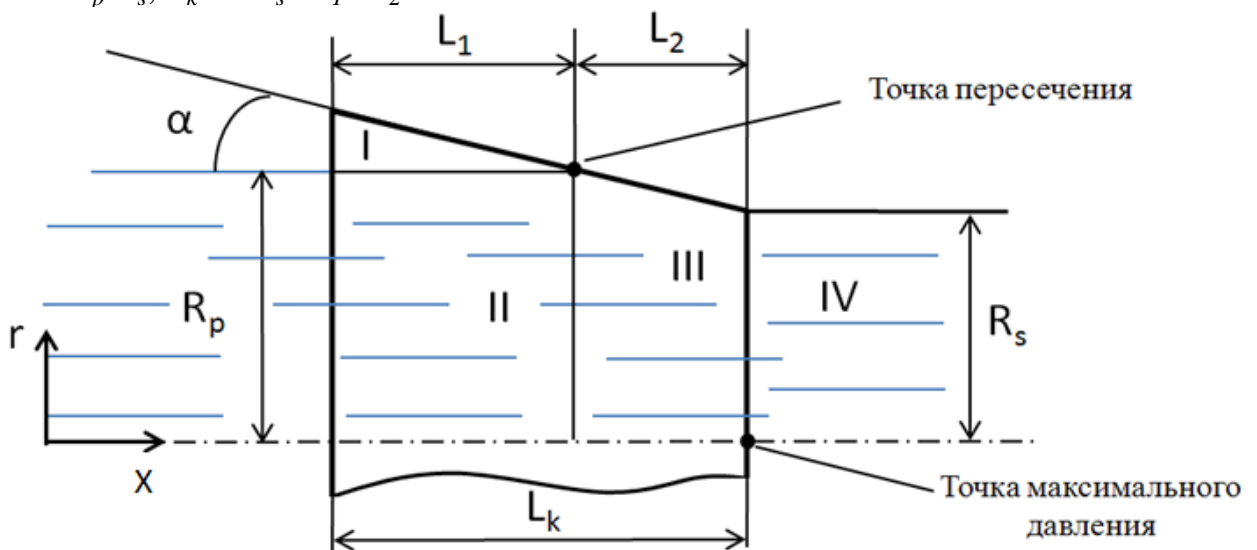


Рисунок 5.8 – Геометрические параметры входного участка фильеры

Верхняя граница для угла наклона принята равной  $40^\circ$ . Для величины  $L_k$  (длина конического участка фильеры) нет четких ограничений. Как будет показано далее, с увеличением длины конического участка фильеры с одновременным уменьшением диаметра входного отверстия давление связующего увеличивается. Однако слишком малая конусность приводит к неоправданному увеличению габаритов фильеры, и увеличивает отжим связующего с наружной поверхности профиля [5]. Учитывая этот факт, в результате расчетов получено соотношение между длиной  $L_k$ , радиусом  $R_s$  и углом конусности, из которого можно определить оптимальное значение угла при заданных двух других параметрах.

Параметры математической модели, используемые при решении задачи оптимизации, приведены в таблице 5.3.

Количество узлов по радиусу  $R_s$  принято равным 60. Исследование сходимости показало, что такого числа достаточно для точного решения. Количество узлов по оси  $r$  при значениях  $R_s < r < R_p$  и по оси  $x$  выбиралось в соответствии с числом узлов по радиусу  $R_s$  для обеспечения равномерного шага сетки.

Таблица 5.3 – Параметры математической модели для решения задачи оптимизации

Параметр	Значение
Радиус элементарного волокна, м	$13 \cdot 10^{-6}$
Вязкость связующего, Па·с	1.5
Скорость пултрузии, мм/мин	70
Радиус стержня, мм	40
Объемное содержание волокна	0.6

На рисунке 5.9 показано изменение давления вдоль оси конического участка фильеры в зависимости от отношения  $R_p/R_s$ . Среди представленных на рисунке отношений наибольшее давление создается при  $R_p/R_s = 1,1$ .

С увеличением отношения  $R_p/R_s > 1,1$  наблюдается спад давления. Объяснить это можно тем, что количество волокон всегда остается постоянным,

тогда как количество связующего возрастает с ростом  $R_p/R_s$ . При этом становится невозможным, чтобы весь возрастающий объем связующего увлекался волокнами в фильере. Поэтому рост количества связующего при неизменном количестве волокон не приводит к увеличению давления при значении  $R_p/R_s > 1.1$ . Также происходит уменьшение зоны I (рисунок 5.8) и ее влияние на увеличение давления.

С целью определить оптимальное значение отношения  $R_p/R_s$  получена серия графиков для точки максимального давления (рисунки 5.10-5.11). При этом для выбранной длины конического участка  $L_k=R_s$ ,  $L_k=1.5R_s$ ,  $L_k=2R_s$  для определенного угла наклона конуса варьировалось значение  $R_p/R_s$ .

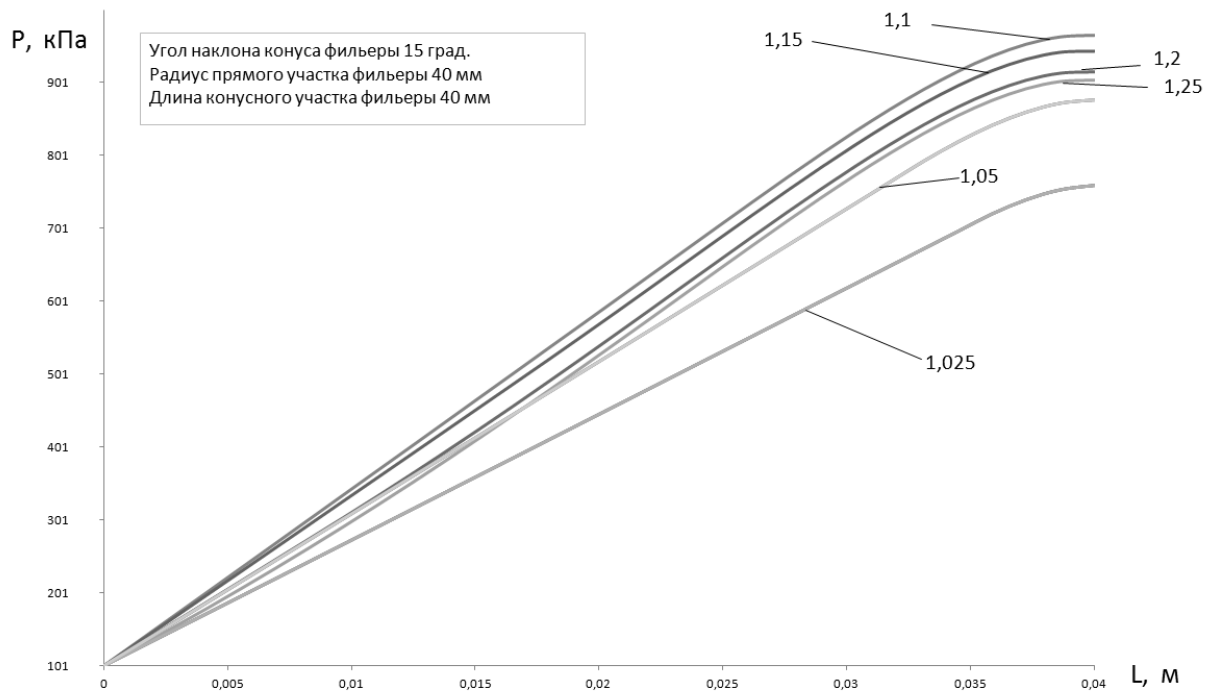


Рисунок 5.9 – Графики зависимости давления от отношения  $R_p/R_s$

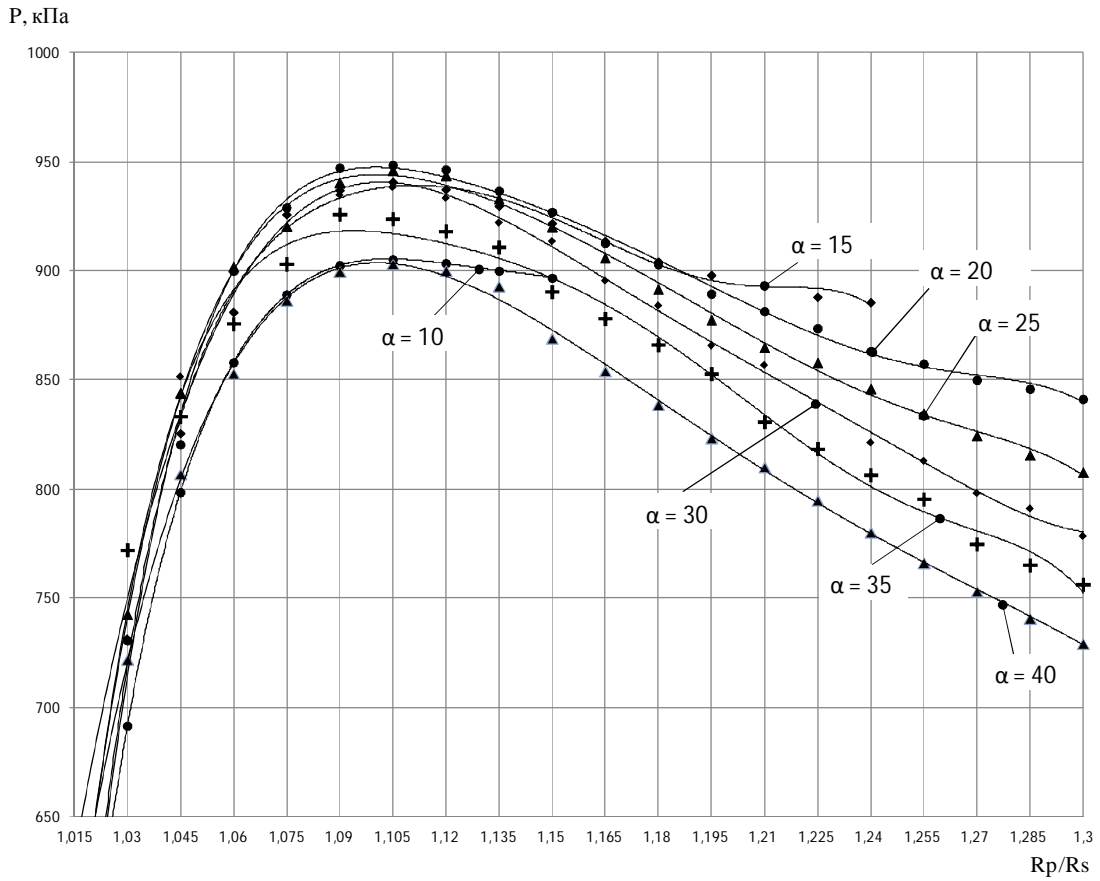


Рисунок 5.10 – Максимальное давление в зависимости от  $R_p/R_s$  при  $L_k = R_s$

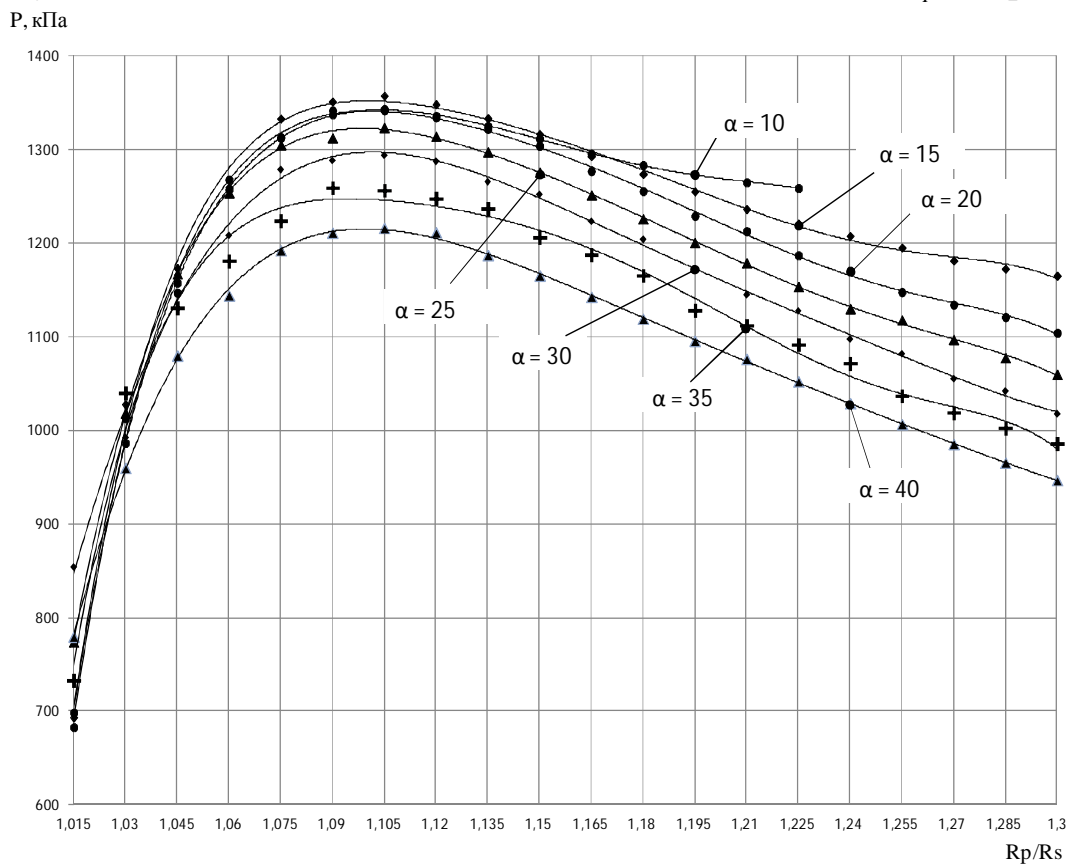


Рисунок 5.11 – Максимальное давление в зависимости от  $R_p/R_s$  при  $L_k = 1,5R_s$



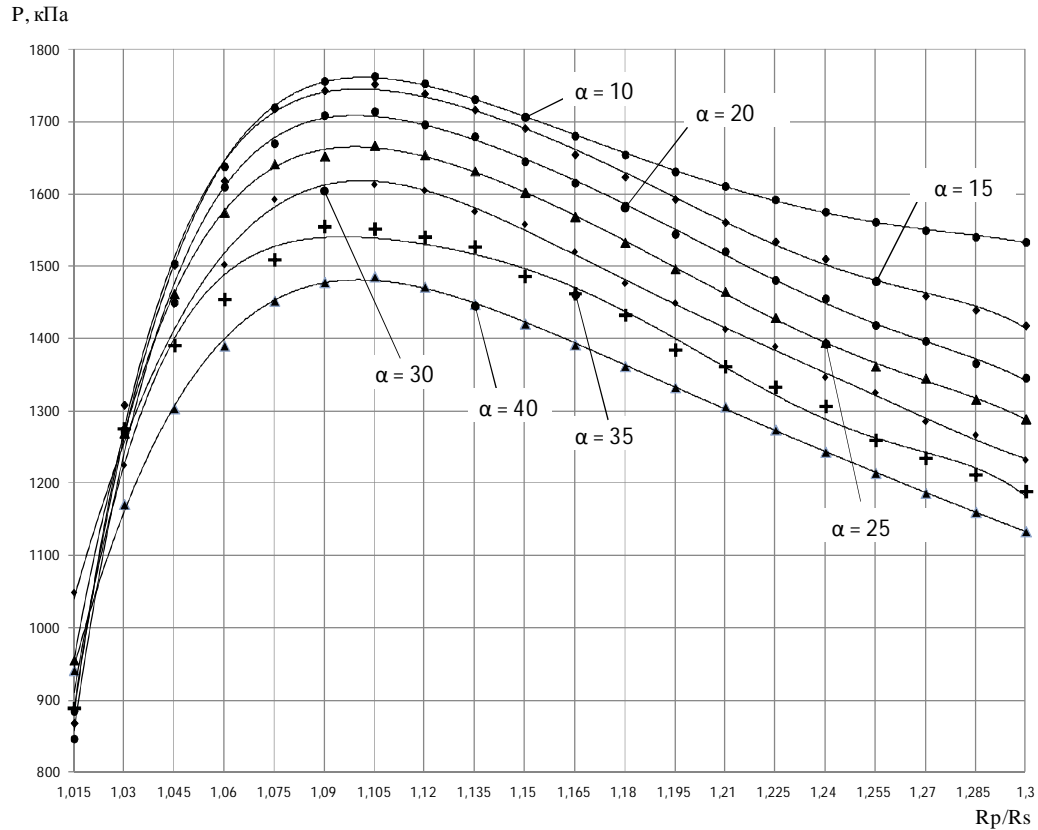


Рисунок 5.12 – Максимальное давление в зависимости от  $R_p/R_s$  при  $L_k = 2R_s$

Точками на графиках показаны значения, полученные с использованием математической модели, через которые проведены линии аппроксимации. Для всех графиков, представленных на рисунках 5.10-5.12, можно выявить следующую особенность – диапазон значений  $R_p/R_s$ , для которого наблюдается экстремум давления, лежит в пределах 1.075-1.1. Отсюда следует предположить, что этот диапазон является оптимальным для всех углов наклона конуса входного участка фильеры и для любой его длины. Принимая за оптимальное значение  $R_p/R_s = 1.09$  и задавая этот параметр постоянным в математической модели, построены графики изменения давления в зависимости от угла наклона для выбранной длины участка (рисунок 5.13). Некоторые данные из решения задачи сведены в таблицу 5.4.

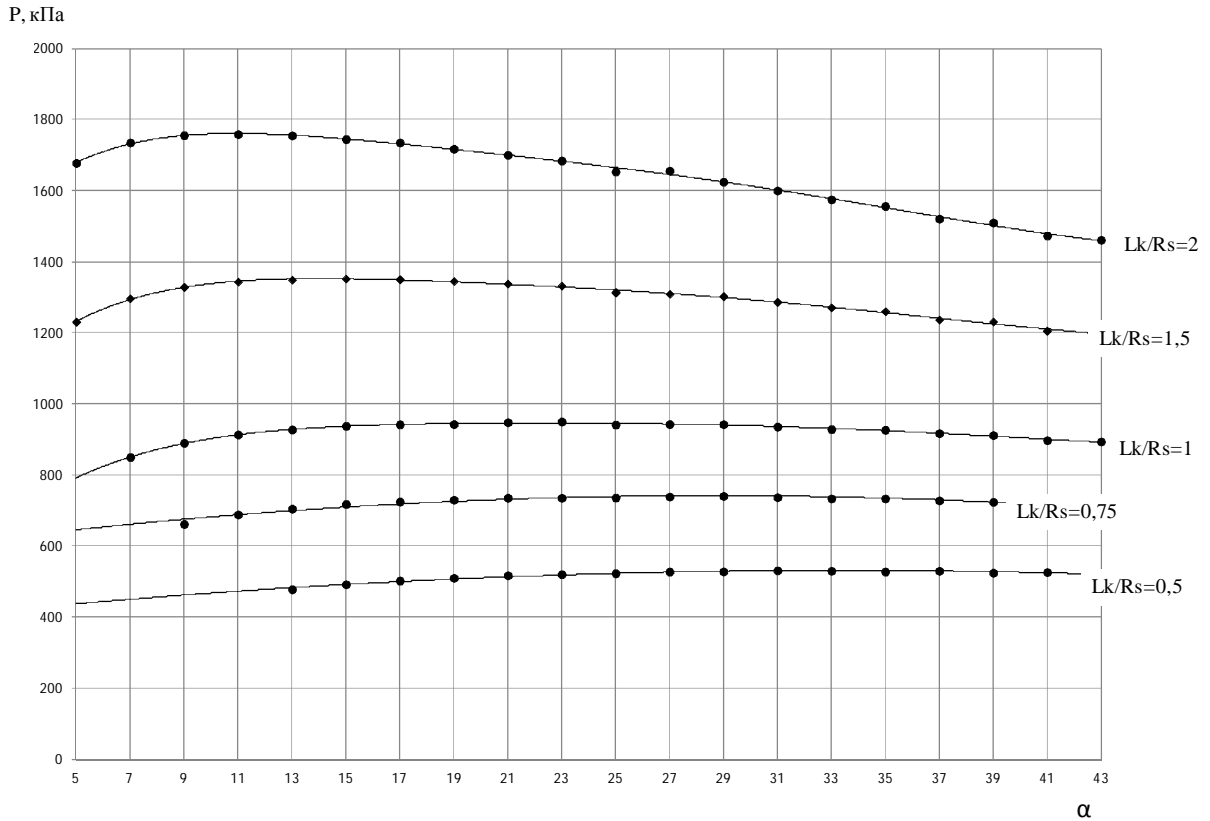


Рисунок 5.13– Максимальное давление в зависимости от угла наклона при  $R_p/R_s = 1.09$

Таблица 5.4 – Сводные данные по результатам расчетов

№ расчета	$b = L_k/R_s$	$\alpha_{\text{опт}}$ , град.	$L_l$ , м	$P$ , кПа
1	1	22	0.03109	949
2	1.5	15	0.04656	1351
3	2	11	0.06148	1758

Сравнением величин  $L_l$  из таблицы 4.4 установлено, что абсцисса точки пересечения  $L_l$  (см. рисунок 5.8) для расчета №2 больше в  $b$  раз по сравнению с величиной, полученной в расчете №1 и меньше в  $b$  раз, чем  $L_l$  для расчета №3. Примем расчет №1 как за «базовый», для которого оптимальный угол составляет  $22^\circ$ . С учетом геометрии конуса фильеры и представленных выше выводов относительно  $L_l$  получаем следующее соотношение для оптимального угла [26]:

$$\alpha \approx \arctg\left(\frac{\text{tg} 22^\circ}{b}\right) \approx \arctg\left(\frac{0.36}{b}\right), \quad (5.5)$$

где  $b = L_k/R_s$ .

Для проверки полученного выражения были выполнены контрольные расчеты для  $b = 0.5$  и  $b = 0.75$ . Найденные оптимальные углы  $37^\circ$  и  $29^\circ$  хорошо совпадают с расчетными (рисунок 5.13).

Анализируя полученные результаты можно отметить, что с увеличением длины конического участка фильеры оптимальный угол уменьшается. В работе [81] также была отмечена тенденция увеличения давления при увеличении длины входного участка с одновременным уменьшением диаметра входного отверстия.

Методика определения оптимального угла конуса входного устройства фильеры используется в процессе деятельности ООО «Полимерпром» при разработке технологии и оборудования пултрузии (см. акт о внедрении №3, приложение 1).

## Выводы

1. В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в комплексе технических решений, направленных на повышение производительности оборудования для изготовления осесимметричных композитных изделий методом пултрузии и повышение качества изготавливаемой продукции.
2. Разработана математическая модель пултрузии осесимметричных изделий для определения температуры, степени отверждения и давления связующего, напряженно-деформированного состояния материала и усилия пултрузии, что позволяет оптимизировать технологический процесс и сформулировать технологические рекомендации.
3. Установлено, что опасные максимальные окружные напряжения на поверхности стержней диаметром 50-80 мм возникают на расстоянии 60-250 мм от фильеры, что позволило определить особенности образования магистральных трещин в изделиях большого диаметра.
4. Установлен оптимальный температурно-скоростной режим пултрузии стеклопластиковых стержней диаметром 16 мм для связующего на основе эпоксидной смолы Epotec-680. Скорость пултрузии составила 25 см/мин при следующем температурном режиме двухсекционной фильеры (°C): [180,155]. Результаты математического моделирования позволили получить изделие высокого качества (полностью отвержденное изделие, отсутствие температурной деструкции материала, глянцевая поверхность).
5. Установлен оптимальный температурно-скоростной режим безфильерного процесса изготовления стеклопластиковой арматуры диаметром 8 мм для связующего на основе эпоксидной смолы CYD-128. Скорость пултрузии составила 3.3 м/мин при следующем температурном режиме восьмисекционной полимеризационной печи (°C): [350,350,220,180,220,190,180,190]. При температуре предварительного нагрева связующего 50 °C производительность процесса увеличена на 9 %.

6. Установлено, что увеличение температуры предварительного нагрева материала композитной арматуры диаметром 8 мм до 50 °С перед подачей в полимеризационную печь позволяет снизить температуру суммарно по секциям на 80 °С при сохранении скорости пултрузии на заданном уровне, либо повысить производительность процесса на 9 % без повышения температуры секций печи.
7. Установлено оптимальное соотношение между углом конусности входного участка фильеры, его длиной и радиусом изделия, из которого можно определить оптимальное значение угла или длину конусного участка фильеры при заданных двух других параметрах.
8. Результаты математического моделирования процесса изготовления осесимметричных изделий методом пултрузии внедрены на ООО «Машспецстрой», ООО «НЦК» и ООО «Полимерпром» при разработке технологии и оборудования для непрерывного изготовления длинномерных изделий из полимерных композиционных материалов.

## Литература

1. Антюфеева, Н. В. Современное методическое обеспечение термоаналитических исследований полимерных композитов и препрегов / Н. В. Антюфеева, В. М. Алексахин, Ю. В. Столянков // Композиты и наноструктуры. - 2014. – Т.6. № 3. - С. 176 - 184.
2. Белоусов, А. И. Методы оптимизации в инженерных задачах / А. И. Белоусов, С. В. Галкин, А. Д. Герман; под общ. ред. С. В. Галкина. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. - 160 с.
3. Блазнов, А. Н. Методы механических испытаний композиционных стержней: монография / А. Н. Блазнов, В. Ф. Волков, А. Я. Рудольф и др. - Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. Ун-та, 2011. - 314 с.
4. Бужгулашвили, В. А. Моделирование и оптимизация технологических параметров жидкофазной пултрузии цилиндрических стержней из терморезистивных полуфабрикатов ПВКМ: автореф. дис ... канд. техн. наук / В. А. Бужгулашвили. - Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ). - М., 2006. - 22 с.
5. Буланов, И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. - 516 с.
6. Васильев, В. В. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов / В. В. Васильев, А. А. Добряков, А. А. Дудченко и др. - М.: МАИ, 1985. - 218 с.
7. Вшивков, С. А., Тюкова, И. С. Учебно-методический комплекс дисциплины "Технология получения композиционных полимерных наноматериалов" [Электронный ресурс] / С.А.Вшивков, И.С.Тюкова // Мин-во образования и науки РФ, Урал. гос. ун-т им. А.М.Горького. - Электрон. дан. - Екатеринбург : [б. и.], 2011.

8. Геминтерн, В. И. Методы оптимального проектирования / В. И. Геминтерн, Б. М. Каган. - М.: Энергия, 1980. - 160 с.
9. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. - М.: Мир, 1985. - 509 с.
10. Гилл, Ф. Численные методы условной оптимизации / Ф. Гилл, У. Мюррей. - М.: Мир, 1977. - 290 с.
11. Горбаткина, Ю. А. Адгезионная прочность в системах полимер-волокно / Ю. А. Горбаткина. - М.: Химия, 1987. - 192 с.
12. Григорьев, С. Н. Механика композитного анизотропного сплошного стержня / С. Н. Григорьев, А. Н. Красновский, А. Р. Хазиев // Пластические массы. - 2012. - № 3. - С. 18 - 25.
13. Дубинчик, Е. В., Пастушков, В. Г., Янковский, Л. В. Особенности применения композитных материалов в строительстве / Е. В. Дубинчик, В. Г. Пастушков, Л. В. Янковский // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. -2013. - Т. 3. С. 175 - 181.
14. Иванов, Г. П., Лебедев, Т. А. О физическом смысле коэффициента Пуассона / Г. П. Иванов, Т. А. Лебедев // Труды Ленингр. политехн. ин-та им. М. И. Калинина. - 1964. - № 236. - С. 38 - 46.
15. Инякин, В. М. Анализ эффективности двух технологий - ручного формования и пултрузии для изготовления панелей интерьера в объеме 700 вагонокомплектов в год / В. М. Инякин, В. С. Карягин, Т. Е. Ушакова и др. // Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте: Сборник статей. Вып. 3. М.: ЦАГИ. - 2004. - С. 167 - 174.
16. Казаков, И. А. Влияние химической усадки на напряженно-деформированное состояние композиционного материала в процессе пултрузии / И. А. Казаков // Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012): материалы всеросс. молод. конф.: Т.1. - М.: МГТУ «Станкин», 2012. - С. 248 - 249.

17. Казаков, И. А. Постановка и решение задачи теплопроводности и полимеризации композитных стержней в процессе пултрузии / И. А. Казаков // Математическое моделирование и информатика: материалы XVI научн. конф.: - М.: МГТУ «Станкин», 2014. - С. 186 - 188.
18. Керамические инфракрасные нагреватели [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.symmetron.ru/suppliers/heaters/heaters-infra-red.shtml>. (02.05.2015).
19. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы / М. Л. Кербер и др. - СПб.: Профессия, 2008. - 560 с.
20. Колмогоров, Г. Л. Оптимальное проектирование конструкций: учебное пособие / Г. Л. Колмогоров, А. А. Лежнева. - Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 2005. - 168 с.
21. Композитные кабели доказывают, то они могут выдерживать высокие напряжения - на земле, под водой и на морских глубинах [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.naftaros.ru/articles/19/>. (03.05.2015).
22. Композиты и их применение в морской добывающей нефтяной промышленности [Электронный ресурс]. – URL: [http://plural.ru/articles/composites\\_offshore\\_oil.php](http://plural.ru/articles/composites_offshore_oil.php). (03.05.2015).
23. Красновский, А. Н. Математическая модель пултрузии крупногабаритных композитных стержней / А. Н. Красновский, И. А. Казаков // Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012): материалы всеросс. молод. конф.: Т.1. - М.: МГТУ «Станкин», 2012. - С. 167 - 174.
24. Красновский А. Н., Казаков И. А. Моделирование отверждения композитной арматуры в процессе производства безфильерным методом / А. Н. Красновский, И. А. Казаков // Дизайн. Материалы. Технология. - 2015. - № 5 (40). - С. 35 - 40.
25. Красновский, А. Н. Определение усилия протяжки осесимметричных композитных стержней в процессе пултрузии / А. Н. Красновский, И. А. Казаков // Дизайн. Материалы. Технология. - 2013. - № 5 (30). - С. 63 - 67.
26. Красновский, А. Н. Оптимизация конструктивных параметров фильеры для изготовления композитных стержней методом пултрузии / А. Н.



- Красновский, И. А. Казаков // Конструкции из композиционных материалов. - 2012. - №4. - С. 16 - 23.
27. Красновский А.Н., Казаков И.А. Влияние давления связующего и внешнего силового воздействия на напряженно-деформированное состояние материала в процессе пултрузии / А. Н. Красновский, И. А. Казаков // Дизайн. Материалы. Технология. - 2012. - № 5 (25). - С. 72 - 77.
28. Красновский А.Н., Казаков И.А. Исследование напряженно-деформированного состояния материала в процессе пултрузии / А. Н. Красновский, И. А. Казаков // Пластические массы. - 2012. - № 10. - С. 22 - 26.
29. Красновский, А. Н., Казаков, И. А., Квачев, К. В. Научные основы непрерывного формообразования изделий из полимерных композиционных материалов: монография / А. Н. Красновский, И. А. Казаков, К. В. Квачев - М.: изд-во МГТУ Станкин, 2012. - 65 с.
30. Кузнецов, Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. - Томск: ТПУ, 2007. - 172 с.
31. Леонтьев, Н. Е. Основы теории фильтрации / Н. Е. Леонтьев. - М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ. - 2009. - С. 24 - 29.
32. Лурье, А. И. Нелинейная теория упругости / А. И. Лурье. - М.: Наука, 1980. - 512 с.
33. Мэттьюз, Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. - М.: Техносфера, 2004. - 408 с.
34. Обзор новых технологий в энергетике [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mrsk-1.ru/docs/3qstYZ.pdf>. (03.05.2015).
35. Общие сведения о разработке и промышленном освоении высоковольтных полимерных изоляторов [Электронный ресурс]. – URL: <http://1kv.com.ua/povpolim/o-razrabotke-polimernih-izolyatorov.html>. (03.05.2015).

36. Ольховик, О.Е. Исследование усадочных, упругих и тепловых свойств терморезистивных полимеров в процессе их отверждения: автореф. дис ... канд. техн. наук / О. Е. Ольховик. - М.: Науч.-исслед. физ.-хим. ин-т им. Л. Я. Карпова, 1973. - 19 с.
37. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
38. Петров, А. В. Математическая модель процесса пултрузии композиционных профилей с терморезистивным связующим / А. В. Петров // Композиц. матер. в конструкциях глубоковод. техн. средств: тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. - Николаев. 1991. - С. 123 - 124.
39. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. - Киев: Наука, 1975. - 400 с.
40. Прохоренко, П. П., Дежкунов, Н. В., Коновалов, Г. Е. Ультразвуковой капиллярный эффект / П. П. Прохоренко, Н. В. Дежкунов, Г. Е. Коновалов. - Минск: Наука и техника, 1981. - 135 с.
41. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: в 2 кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. - М.: Мир, 1986. - 349 с.
42. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. - М.: Наука, 1978. - 532 с.
43. Сафонов, А. А. Математическое моделирование механики технологического процесса пултрузии стеклопластиковых изделий: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / А. А. Сафонов. - М., 2006. - 155 с.
44. Сафонов, А. А. Математическое моделирование технологического процесса пултрузионной вытяжки толстостенных цилиндрических стержней и оболочек / А. А. Сафонов // Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ): материалы IV науч.-практ. конф. с междунар. участием - М.: 2005. - С. 310 - 315.
45. Седов, Л. И. Механика Сплошной среды: в 2 т. / Л. И. Седов. - М.: Наука, 1970. - 2 т. - 568 с.

46. Скудра, А. М. Прочность армированных пластиков / А. М. Скудра, Ф. Я. Булавс. - М.: Химия, 1982. - 216 с.
47. Способ подачи армирующих волокон для технологических линий непрерывного изготовления изделий из полимерных композиционных материалов: пат. 2494953 Рос. Федерация: В65Н 51/00, В29С 31/00, D02Н1/00 / Красновский А. Н., Казаков И. А., Хазиев А. Р. и др.; заявитель и патентообладатель Московский гос. техн. ун-т СТАНКИН. - № 2012116422/05; заявл. 24.04.2012; опубл. 10.10.2013.
48. Справочник по композиционным материалам. В 2-х кн. Кн. 2 /под ред. Дж. Любина. - М.: Машиностроение, 1988. - 584 с.
49. Старовойтова, И.А. Одноосноориентированные армированные пластики: анализ состояния, проблемы и перспективы развития / И. А. Старовойтова, В. Г. Хозин, А. М. Сулейманов и др. // Изв. КГАСУ. - 2012. - № 4. - С. 332 - 339.
50. Стеклопластиковая анкерная крепь [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.bzs.ru/production/products\\_for\\_the\\_petrochemical\\_industry/produktsiya\\_dlya\\_ugledobyvayushchey\\_otrasli\\_/shakhtnyy\\_anker/](http://www.bzs.ru/production/products_for_the_petrochemical_industry/produktsiya_dlya_ugledobyvayushchey_otrasli_/shakhtnyy_anker/). (22.04.2015).
51. Технологический комплекс для изготовления сложноармированных изделий из полимерных композиционных материалов: пат. 122606 Рос. Федерация: В29С 70/30, В29С 63/04 / Красновский А.Н., Казаков И.А., Квачев К.В.; заявитель и патентообладатель Московский гос. техн. ун-т СТАНКИН. - № 2012120377/05; заявл. 17.05.2012; опубл. 10.12.2012.
52. Устройство ультразвуковой пропитки волокнистых материалов: пат. 2538873 Рос. Федерация: В05С 3/12 / Красновский А. Н., Казаков И. А., Шурко А. Н.; заявитель и патентообладатель Московский гос. техн. ун-т СТАНКИН. - № 2013140043/05; заявл. 29.08.2013; опубл. 10.01.2015.
53. Хозин, В. Г. Модифицирование эпоксидных композиций ультразвуком / В. Г. Хозин, А. А. Каримов, А. М. Череватский и др. // Механика композиционных материалов. - 1984. - № 4. - С. 702 - 706.

54. Хоничев, Ю. В. Расчет тепловых потерь неизолрованными трубопроводами при надземной прокладке: методические указания / Сост. : Ю. В. Хоничев, А.А.Ивашкевич. - Хабаровск: ГОУ ВПО Хабаровский гос. тех. ун-т. - 2000. - 15 с.
55. Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика / В. Штиллер. - М.: Мир, 2000. - 176 с.
56. An analytic definition of the border polymerization line for axisymmetric composite rods / S. N. Grigoriev, A. N. Krasnovskii, **I. A. Kazakov** et al // Applied Composite Materials. - 2013. - Vol. 20. - № 6. - P. 1055 - 1064.
57. Analysis of kinetic parameters of an urethane-acrylate resin for pultrusion process / M. Sarrionandia, I. Mondragon, S. M. Moschiar at al. // Journal of applied polymer science. - 2000. № 77. - P. 355 - 362.
58. Astrom, B. T. Modeling of thermoplastic pultrusion / B. T. Astrom // 46-th Annual Conference: Conference Proceedings № 18 - 2121. - Composites Institute. - 1991. - P. 4-A/1-9.
59. Atarsia, A. Effect of pulling speed on the seizes of the liquid, gel and solid zone, during thermoset pultrusion / A. Atarsia, R. Boukhili // Journal of reinforced plastics and composites. -2000. - № 19/18. - P. 1493 -1503.
60. Aylward, L., Douglas, C., Roylance, D. A Transient Finite Element Model for Pultrusion Processing / L. Aylward, C. Douglas, D. Roylance // Polym. Proc. Eng. - 1985. - № 3. - P. 247 - 261.
61. Aylward, L., Douglas, C., Roylance, D. A Transient Finite Element Model for Pultrusion Processing / L. Aylward, C. Douglas, D. Roylance // Polymer Process Engineering. - 1985. -№ 3(3). - P. 247 - 261.
62. B. Tomas Astrom edited by Raju S. Dave & Alfred C. Loos. Pultrusion in processing of composites. Hanser/Gardner Publications Inc. 2000.
63. Bai Y., Vallee T., Keller, T. Modeling of thermal responses for FRP composites under elevated and high temperatures / Y. Bai, T. Vallee, T. Keller //Composites Science and Technology. - 2008. - Vol. 68. - P. 47 - 56.

64. Baran, I. Optimization of the thermosetting pultrusion process by using hybrid and mixed integer genetic algorithms / I. Baran, C. C. Tutum, J. H. Hattel // *Applied Composite Materials*. - 2013. - Vol. 20. - P. 449 - 463.
65. Baran, I. The effect of thermal contact resistance on the thermosetting pultrusion process / I. Baran, C. C. Tutum, J. H. Hattel // *Composites B*. - 2013. - Vol. 95. - P. 995 - 1000.
66. Batch, G. L., Macosko, C. W. Heat transfer and cure in pultrusion: model and experimental verification / G. L. Batch, C. W. Macosko // *AIChE J*. - 1993. - № 39. - P. 1228 - 1241.
67. Batch, G., Macosko, C. A Computer Analysis of Temperature and Pressure Distributions in a Pultrusion Die / G. Batch, C. Macosko // *Proceedings of the SPI Composite Institute's 42nd Annual Conference, The Society of Plastics Industry*. - 1987. - № 12. - P. 1 - 7.
68. Bibbo, M. A, Gutowski, T. G. An Analysis of the Pulling Force in Pultrusion / M. A. Bibbo, T. G. Gutowski // *SPE Tech. Papers*. - 1986. - № 32. - P. 1430 - 1432.
69. Brusckke, M. V. Flow of Generalized Newtonian Fluids Across a Periodic Array of Cylinders / M. V. Brusckke, S. G. Advani // *Journal of Rheology*. - 1993. - Vol. 37(3). - P. 479 - 498.
70. Carlone, P. Pultrusion manufacturing process development by computational modelling and methods / P. Carlone, G. S. Palazzo, R. Pasquino // *Mathematical and Computer Modelling*. - 2006. - Vol. 44. - № 7-8. - P. 701 - 709.
71. Carlone, P. Pultrusion manufacturing process development: cure optimization by hybrid computational methods / P. Carlone, G. S. Palazzo, R. Pasquino // *Computers and Mathematics with Applications*. - 2007. - Vol. 53. - № 9. - P. 1464 - 1471.
72. Carlone, P. Viscous pull force evaluation in the pultrusion process by a finite element thermo-chemical rheological model / P. Carlone, G. S. Palazzo // *International Journal of Material Forming*. - 2008. - Vol. 1. - № 1. - P. 831 - 834.

73. Chachad, Y. R. Thermal characterization for three dimensional irregular shaped graphite and fiberglass epoxy based pultruded composites: Ph.D. Dissertation: 1995 / Y. R. Chachad. - University of Mississippi.
74. Chekhovskii, I. R. Convective heat transfer in a vertical gap with free air flow / I. R. Chekhovskii, V. V. Sirotkin, Iu. V. Chi-Dun-Chi, V. A. Chebakov // Moscow: Energetika, vol. 23, May 1980, p. 64 -70.
75. Computational Approaches for Modeling the Multiphysics in Pultrusion Process / P. Carlone, I. Baran, J. H. Hattel et al // Advances in Mechanical Engineering. - 2013. - № 1. - P. 831 - 834.
76. Die and post-die temperature and cure in graphite/epoxy composites / M. Valliappan, J. A. Roux, J. G. Vaughan et al // Composites B. - 1996. - Vol. 27. - № 1. - P. 1 - 9.
77. Experimental and theoretical analysis of pulling force in pultrusion and resin injection pultrusion (RIP) - part II: modeling and simulation / S. Li, L. Xu, Z. Ding et al // Journal of Composite Materials. -2003. - Vol. 37. - № 3. - P. 195 - 216.
78. Gadam, S. U. K. The impact of pultrusion processing parameters on resin pressure rise inside a tapered cylindrical die for glass-fibre/epoxy composites / S. U. K. Gadam, J. A. Roux, T. A. McCarty, J. G. Vaughan // Composites Science and Technology. - 2000. - № 60. - P. 945 - 958.
79. Gebart, B. R. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM / B. R. Gebart // Journal of Composite Materials. - 1992. - № 26. - P. 1100 - 1133.
80. Gonzalez-Romero, V. M. Isothermal and temperature programmed kinetic studies of thermosets / V. M. Gonzalez-Romero, N. Casillas // Polymer Engineering and Science. - 1989. - Vol. 29. - P. 295 - 301.
81. Gorthala, R., Roux, J. A., Vaughan, J. G. A Model to predict Resin Pressure/Back Flow in the Tapered inlet of a Pultrusion Die / R. Gorthala, J. A. Roux, J. G. Vaughan // 48th Annual Conference, Composites Institute, SPI Inc, February 8–11, 1993. - P. 2-D/1.
82. Gorthala, R., Roux, J. A., Vaughan, J. G. Impact of pultrusion pull speed on temperature and degree of cure profiles within a composite material / R. Gorthala, J.

- A. Roux, J. G. Vaughan // 46th Annual Conference, Composites Institute, SPI Inc, February 18–21, 1991. - P. 13-D/1-5.
83. Grigoriev, S. N. The friction force determination of large-sized composite rods in pultrusion / S. N. Grigoriev, A. N. Krasnovskii, I. A. Kazakov // *Applied Composite Materials*. - 2014. - Vol. 21. - № 4. - P. 651 - 659.
84. Grigoriev, S. N. The Impact of Pre-heating on Pressure Behavior in Tapered Cylindrical Die in Pultrusion of Large-sized Composite Rods / S. N. Grigoriev, A. N. Krasnovskii, I. A. Kazakov // *Advanced Materials Research*. - 2015. Vol. 1064. - P. 120 - 127.
85. Han, C. D., Lee, D.S., Chin, H.B. Development of a Mathematical Model for the Pultrusion Process / C. D. Han, D. S. Lee, H. B. Chin // *Polymer Engineering Science*. - 1986. - № 26. - P. 3933 - 404.
86. Joshi, S. C. Three-dimensional finite-element/nodal-control-volume simulation of the pultrusion process with temperature-dependent material properties including resin shrinkage / S. C. Joshi, Y. C. Lam // *Composites Science and Technology*. - 2001. -Vol. 61. - № 11. - P. 1539 - 1547.
87. Joshi, S. C., Lam, Y. C. Three-dimensional finite-element/nodal-control-volume simulation of the pultrusion process with temperature-dependent material properties including resin shrinkage / S. C. Joshi, Y. C. Lam // *Composites Science and Technology*. - 2001. - № 61(11). - P. 1539 - 1547.
88. Kamal, M. R. Kinetics and characterization of thermoset cure / M. R. Kamal, S. Sourour // *Polymer Engineering and Science*. - 1973. - № 13(1). - P. 59 - 64.
89. Kamal, M. R. Thermoset Characterization for Moldability Analysis / M. R. Kamal // *Polymer Engineering and Science*. - 1974. - Vol. 14. - P. 231 - 239.
90. Kim, D. H. A model for thermosetting composite pultrusion process / D. H. Kim, P. G. Han, G. H. Jin, W. I. Lee // *Journal of Composite materials*. - 1997. - № 31(20). - P. 2105 - 2122.
91. Kommu, S., Khomami, B., Kardos, J. Modeling of Injected Pultrusion Processes: A Numerical Approach / S. Kommu, B. Khomami, J. Kardos // *Polym. Composites*. - 1998. -Vol. 19. - P. 335 - 336.

92. Krasnovskii, A.N. Determination of the optimal speed of pultrusion for large-sized composite rods / A. N. Krasnovskii, I. A. Kazakov // *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*. - 2012. - Vol. 2. - № 3. - P. 21 - 26.
93. Kutin A.A. The Fiber Orientation Angle Determination for a Composite Anisotropic Solid Rod in Pultrusion / A. A. Kutin, A. N. Krasnovskii, I. A. Kazakov // *Advanced Materials Research*. 2014. - Vol. 941 - 944. - P. 262273 - 2278.
94. Lackey, E. An analysis of factors affecting pull force for the pultrusion of graphite/epoxy composites / E. Lackey, J. G. Vaughan // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. - 1994. - Vol.13. - № 3. - P. 188 - 198.
95. Lam, W. K. An Improved Kinetic Model for The Auto catalytic Curing of Styrene Based Thermoset Resins / W. K. Lam, H. P. Plaumann, T. Tran // *Journal of Applied Polymer Science*. - 1990. - V. 41. - P. 3043 - 3057.
96. Lin Liu, X. Simulation of heat transfer and cure in pultrusion with a general-purpose finite element package / X. Lin Liu, I. G. Crouch, Y. C. Lam // *Composites Science and Technology*. - 2000. - Vol. 60. - № 6. - P. 857 - 864.
97. Looyeh, M., Bettess, P. A finite element model for the fireperformance of GRP panels including variable thermal properties / M. Looyeh, P. Bettess // *Finite Elem Anal Des*. - 1998. - № 30(4). - P. 313 - 24.
98. Looyeh, M., Rados, K., Bettess, P. Thermomechanical responses of sandwich panels to fire / M. Looyeh, K. Rados, P. Bettess // *Finite Elem Anal Des*. - 2001. - № 37(11). - P. 913 - 27.
99. Material characterization and residual stresses simulation during the manufacturing process of epoxy matrix composites / Y. Abou Msallem, F. Jacquemin, N. Boyard et al // *Composites A*. - 2010. - Vol. 41. - № 1. - P. 108 - 115.
100. *Methods of Optimal Design* / N. V. Banichuk, V. I. German, V. V. Kobelev et al. // *Optimal Design. Theory and Applications to Materials and Structures* / Ed. by V.V. Vasiliev, Z. Gürdal. - 1999. - P. 31 - 63.
101. Michaud, D. J. *Simulation - Based Design And Control of Thick Composite Laminates Manufactured By Resin Transfer Molding*: Ph.D. thesis University of Delaware, 2000.



102. Mijovic, J., Wijaya, J. Effects of Graphite Fiber and Epoxy Matrix Physical Properties on the Temperature Profile Inside Their Composite During Cure / J. Mijovic, J. Wijaya // SAMPE journal. - 1989. № 2. - P. 35 - 39.
103. Monaghan, P. F., Brogan, M. T., Oosthuizen, P. H. Heat transfer in an autoclave for processing thermoplastic composites / P. F. Monaghan, M. T. Brogan, P. H. Oosthuizen // Comp Manufac. - 1991. - Vol. 2. - P. 233 - 242.
104. Mustafa, I., Khomami, B., Kardos, J. 3-D Nonisothermal Flow Simulation Model for Injected Pultrusion Processes / I. Mustafa, B. Khomami, J. Kardos // AIChE J. - 1999. - Vol. 45. - P. 151 - 163.
105. Ng, H. Kinetic Studies of a Composite Thermoset Cure Reaction - Application in Pultrusion Simulation / H. Ng, I. Manas-Zloczower // Polymer Engineering and Science. - 1989. - № 29. - P. 302 - 307.
106. Price, H. Curing and Flow of Thermosetting Resins for Composite Material Pultrusion / H. Price // PhD Thesis, Old Dominion University, Virginia. 1979.
107. Price, H. L., Cupschalk, S. G. Pulling Force and its variation in Composite Materials Pultrusion / H. L. Price, S. G. Cupschalk // Polymer Blends and Composites in Multiphase Systems. - 1984. P. 301 - 322.
108. Prime, R. B. Thermal Characterization of Polymeric Materials / R. B. Prime // E. Turi, Ed., Academic Press, inc., Orlando, 1981.
109. Process induced residual stresses and distortions in pultrusion / I. Baran, C. C. Tutum, M. W. Nielsen et al // Composites B. - 2013. - Vol. 51. - P. 148 - 161.
110. Pultrusion of epoxy matrix composites: pulling force model and thermal stress analysis / S. M. Moschiar, M. M. Reboredo, H. Larrondo et al // Polymer Composites. - 1996. - Vol.17. - № 6. - P. 850 - 858.
111. Raper, K. S. Investigation of the pressure behavior in a pultrusion die for graphite/epoxy composites / K. S. Raper, J. A. Roux, T. A. McCarty, J. G. Vaughan // Composites. - 1999. -Part A 30. - P. 1123 - 1132.
112. Roux, J. A. Comparison of measurements and modeling of Pultrusion of a Fiberglass/Epoxy I-Beam / J. A. Roux, G. Vaughan, R. Shanku, E. S. Arafat at all //

- Journal of Reinforced Plastics and Composites. - 1998. - № 17(17). - P. 1557 - 1579.
113. Sangani, A.S. Slow flow past periodic arrays of cylinders with application to heat transfer / A. S. Sangani, A. Acrivos // *Internat. J. Multiphase Flow.* - 1982. - № 8(3). - P. 193 - 206.
  114. Shanku, R. Rheological characteristics and cure kinetics of EPON 862/W epoxy used in pultrusion / R. Shanku, J. G. Vaughan, J. A. Roux // *Advances in polymer technology.* - 1997. № 16. P. 297 - 311.
  115. Srinivasagupta, D. Analysis of pull-force in injected pultrusion / D. Srinivasagupta, J. L. Kardos, B. Joseph // *Advanced Materials - Covina.* - 2006. - № 38 (1). - P. 39 - 46.
  116. Steady state and dynamic analysis of a bench-scale injected pultrusion process / D. Srinivasagupta, S. Potaraju, J. L. Kardos et al // *Composites A.* - 2003. - Vol. 34. - № 9. - P. 835 - 846.
  117. Sullivan, R. M., Salamon, N. J. A finite element method for the thermochemical decomposition of polymeric materials – I. Theory / R. M. Sullivan, N. J. Salamon // *Int J Eng Sci.* - 1992. - № 30(4). - P. 431 - 441.
  118. Sullivan, R. M., Salamon, N. J. A finite element method for the thermochemical decomposition of polymeric materials – II. Carbon Phenolic Laminates / R. M. Sullivan, N. J. Salamon // *Int J Eng Sci.* - 1992. - № 30(7). - P. 939 - 951.
  119. Sumerak, J. E. Understanding Pultrusion Process Variables for the First Time / J. E. Sumerak // *Proceedings of 40th Annual Conference, Reinforced Plastics / Composites Institute, SPI Inc, Session 2-B.* - 1985.
  120. Thermal Model for Three-Dimensional Irregular Shaped Pultruded Fiberglass Composites / Y. Chachad, J. Roux, J. Vaughan, E. Arafat // *Journal of composite materials.* - 1996. - V.30. - P. 692 - 721.
  121. Travis, A. Process induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates / A. Travis, J. W. Bogetti, Jr. Gillespie // *Journal of Composite Materials.* - 1992. - № 26(5). - P. 626 - 660.

122. Tulig, T. J. A heat Transfer and Reaction Model for Pultrusion / T. J. Tulig // AIChE annual meeting. Chicago, II (1985).
123. Vasiliev, V. V. Advanced mechanics of composite materials and structural elements, third edition / V. V. Vasiliev, E. V. Morozov. - Oxford. - Elsevier Science Ltd. - 2013. - 818 p.
124. Vasiliev, V. V. Mechanics and Analysis of Composite Materials / V. V. Vasiliev, E. V. Morozov. - Oxford. - Elsevier Science Ltd. - 2001. - 412 p.
125. Walsh, S. M., Charamchi, M. Heat Transfer Characteristics of a Pultrusion Process / S. M. Walsh, M. Charamchi // ASME 25th National Heat Transfer Conference, Houston. - 1988. - P. 23 - 28.
126. White, S. R. Process Modeling of Composite Materials: Residual Stress Development during Cure. Part I. Model Formulation / S. R. White, H. T. Hahn // Journal of Composite Materials. -1992. № 26 (16). - P. 2402 - 2422.
127. Yun, M. S. Analysis of pulling force during pultrusion process of phenolic foam composites / M. S. Yun, W. I. Lee // Composites Science and Technology. - 2008. - Vol.68. - № 1. - P. 140 - 146.
128. Базальтопластиковый анкер Гален (шахтная крепь) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vkp-pro.ru/catalog/bazaltoplastikoviy-anker-galen/>. (20.04.2015).

## Приложение 1 – Акты о внедрении



# ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ МАШСПЕЦСТРОЙ

614056, г. Пермь, ул. Целинная, 2А  
Телефон/факс: (342) 267-28-08, 267-25-55, 267-30-11  
[www.mssgroup.ru](http://www.mssgroup.ru), [info@mssgroup.ru](mailto:info@mssgroup.ru)



«УТВЕРЖДАЮ»  
Генеральный директор  
ООО «Машспецстрой»  
О.В. Шаклеин

«10» марта 2015г.

### АКТ о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Казакова Ильи Александровича

Комиссия в составе:

- Председатель Шаклеин Олег Витальевич,
- Члены комиссии: Польшгалова Ольга Александровна,  
Шаклеин Александр Олегович,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Казакова Ильи Александровича *«Разработка технологии непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии»*, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в процессе деятельности ООО «Машспецстрой» при разработке технологии и оборудования для непрерывного изготовления длинномерных изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в виде математической модели процесса нидлтрузии, позволившей:


- оптимизировать параметры технологического процесса и увеличить скорость вытяжки стеклопластиковых стержней диаметром 8 мм с 3 м/мин до 3,3 м/мин. Увеличение скорости вытяжки композитного стержня значительно снизило себестоимость выпуска арматуры и улучшило качество выпускаемой продукции;
- рассчитать усилие протяжки при подаче материала через формующую втулку при различных скоростях технологического процесса в зависимости от количества наполнителя и вязкости связующего. Величина усилия протяжки позволяет рассчитать величину прогиба композитного стержня в процессе его изготовления и оценить возможности протягивающего устройства.

Председатель комиссии:

  
Шаклеин О.В.

Члены комиссии:

  
Польшгалова О.А.

  
Шаклеин А.О.



НЦК

Общество с ограниченной ответственностью «Нанотехнологический центр  
композитов»  
ООО «НЦК»

«20» февраля 2015г.

№ 4/3

г. Москва

**УТВЕРЖДАЮ**  
Генеральный директор  
ООО «НЦК»  
М.А. Столяров  
«20» февраля 2015г.

АКТ

о внедрении результатов  
кандидатской диссертационной работы  
Казакова Ильи Александровича

Комиссия в составе:

- Председатель Столяров Михаил Александрович,
- Члены комиссии: Шалденков Александр Евгеньевич, Суменкова Ольга Дмитриевна,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Казакова Ильи Александровича «Разработка технологии непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при прогнозировании с помощью математической модели пултрузии скорости протяжки, температуры фильеры, температуры преднагрева связующего осесимметричных стеклопластиковых стержней и труб для пултрузионной установки, используемой в ООО «НЦК». Использование математической модели позволило:

1. Оптимизировать параметры технологического процесса и увеличить скорость вытяжки стеклопластиковых стержней диаметром 16 мм с 15 см/мин до 25 см/мин. Увеличение скорости вытяжки композитных изделий значительно снизило себестоимость производства;
2. Рассчитать напряжения, возникающие в композиционном материале в процессе производства стержней и труб. Определение напряжений позволяет получать изделия с высокими качеством поверхности и прочностью.

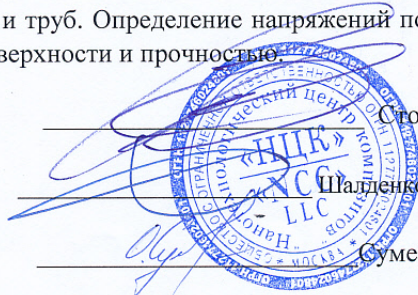
Председатель комиссии:

Столяров М.А.

Члены комиссии:

Шалденков А.Е.

Суменкова О.Д.



  
**ПОЛИМЕРПРОМ**  
 общество с ограниченной  
 ответственностью  
**«ПОЛИМЕРПРОМ»**  
 603074 г. Н. Новгород ул. Нефтегазовская д. 1а  
 тел. +7 (831) 243 10 00, факс. +7 (831) 243 23 03  
 www.polymerprom-nn.ru  
 E-mail: [polymerprom@polymerprom-nn.ru](mailto:polymerprom@polymerprom-nn.ru)



УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор  
 ООО «Полимерпром»

Ткаченко Н.М.  
 « 15 » апреля 2015 г.

АКТ  
 о внедрении результатов  
 кандидатской диссертационной работы  
Казакова Ильи Александровича

Комиссия в составе:

- Председатель                    технический директор    Федяков В.Ю.,
- Члены комиссии:                зам.ген.директора по
- технологии                    Мельников С.А.,
- нач.отдела оборудования Медов Е.А

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Казакова Ильи Александровича *«Разработка технологии непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии»*, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в процессе деятельности ООО «Полимерпром» при разработке технологии и оборудования для непрерывного изготовления длинномерных изделий из полимерных композиционных материалов в виде:

1. Математической модели процесса пултрузии, позволяющей определять температуру, степень отверждения, давление связующего, напряженно-деформируемое состояние материала и усилие протяжки с учетом технологических параметров процесса и конструктивных параметров оборудования при различных исходных данных.
2. Методики определения оптимального угла конуса входного устройства фильеры, а также метода определения зависимости вязкости связующего от температуры и степени отверждения.

Председатель комиссии:

  
 \_\_\_\_\_ Федяков В.Ю.

Члены комиссии:

  
 \_\_\_\_\_ Мельников С.А.

  
 \_\_\_\_\_ Медов Е.А.

## Приложение 2 – текст программы расчета температуры и степени отверждения композитной арматуры

```

% Программа определения температуры и степени отверждения
для композитной арматуры V.1.0 (экспериментальная проверка)
clear all
% Вводные данные
R=4; % - Радиус стержня, мм.
U=2/60; %-скорость пултрузии, м/сек.
Tvn=24;% Температура окружающей среды, С.
Lp=40; % - Общая длина печи полимеризации, м.
%Свойства волокна
rof=2.56*10^6; % Плотность волокна, г/м^3
cf=0.84; % Удельная теплоемкость волокна, Дж/(г*С)
ktpf=1.1; % Коэффициент теплопроводности волокна, Вт/(м*К)
%Свойства связующего
ror=1.055*10^6; % Плотность жидкой смолы, г/м^3
rorc=1.266*10^6; % Плотность отвержденной смолы, г/м^3
cru=1.686; % Удельная теплоемкость жидкого связующего,
Дж/(г*С)
src=cru-0.328; % Удельная теплоемкость отвержденного
связующего, Дж/(г*С)
ktpr=0.2; % Коэффициент теплопроводности связующего,
Вт/(м*К)
% кинетические константы
A1=18;% 1/s
EA1=23820;% Эффективная энергия активации процесса, Дж/Моль
n2=2.1; %порядок реакции
A2=2850;% 1/s
EA2=38400;
n1=0.85; %порядок реакции
Htot=456.44; % теплота реакции полимеризации, Дж/г
% Заданная температура в печи, С:
TF=[230,230,230,230,230,230,230,230];
% Превышение температуры на ИК излучателе над заданной
температурой, С:
tp=70;
% Параметр, влияющий на точность решения(чем он выше, тем
выше точность)
N=100; % Число точек вдоль радиуса R.
Mp=400; % - Число точек вдоль участка печи
% Эксперимент 1, измеренная температура воздуха в печи:
TV1=[24,24,24,25.4,28,31.3,34.6,38.8,43.5,48.8,55.7,61.6,67
.1,75.7,82.5,...
89.3,96.1,102.9,109.6,116.3,123,131,137,144,150.5,156.6,163
,169,177,...

```

```

180.8,187.6,193,198.9,203.9,209.3,213.9,219.6,223,227.8,230
.9];
% Эксперимент 1, измеренная температура внутри стержня:
TP1=[26,30,36,45,55,65,78,92,108,130,154,168,180,189,196,20
2,207,213,...
220,225,231,238,244,249,254,260,265,269,275,279,282,287,290
,295,298,...
302,305,308,309,309];
% Эксперимент 1, график выхода ИК нагревателя на
номинальный режим
TK=[23.99,50,85,120,150,175,195,215,235,250,260,270,280,290
,300,300,...
300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300
,300,300,...
300,300,300,300,300,300,300];
% Эксперимент 2, измеренная температура воздуха в печи:
TV2=[201,204,207,210,214,219,222,226,229,234,234.7,235,234,
237.4,237.1,...
238.8,236.2,236,235.8,235.5,235.2,234.2,233.8,233.7,233.6,2
33.5,233.2,...
233,233,232.5,232,232,232,231.8,231.7,231.6,231.6,231.5,231
.5,231.4];
% Эксперимент 2, измеренная температура внутри стержня:
TP2=[24,65,128,175,202,225,250,258,271,278,282,283,285,287,
280,279,277,...
275,274,273,273,272,271,270,270,269,269,269,268,268,268,268
,267,267,...
267,267,267,267,267,267];
% Вычисляемые константы (не менять пользователю)
Rg=8.314; % универсальная газовая постоянная, 8.3144621
м2*кг/с2/К/Моль
Coef=273; % Коэффициент перевода градусов Цельсия в
Кельвины.
R=R/1000; % Радиус стержня в м.
vf=0.6;% Объемное содержание ВОЛОКНА конечного продукта.
ktpl=1/(vf/ktpf+(1-vf)/ktpr); % коэффициент
теплопроводности в
% направлении r, Вт/(м*К)
NTE=size(TV1); %Число экспериментальных точек температур
Z=Lp/(NTE(2)-1); % Диапазон между экспериментальными
точками
NTF=size(TF); %Число точек температур для заданных
температур
ZF=Lp/(NTF(2)-1); % Диапазон между точками температур
% Определение шага координатной сетки

```



```

hf=Lp/(Mp-1); % Шаг по оси ОХ в фильтре, м
tr=R/(N-1); % Шаг по оси ОУ по радиусу, м
%*****Расчет*****
%*****
EXIT1=zeros(Mp,1);% Нулевая матрица для температур для
записи в файл
EXIT2=zeros(Mp,1);% Нулевая матрица для температур для
записи в файл
% Преобразование TF
TFF=zeros(1,Mp);
j=1;
for i=2:Mp % количество столбцов
    if (i-1)*hf<=ZF*j
        TFF(1,i)=Coef+TF(j)+(TF(j+1)-TF(j))/ZF*((i-1)*hf-
ZF*(j-1));% ГУ на фильтре
    elseif j>=NTF(2)-1
    else
        TFF(1,i)=Coef+TF(j+1)+(TF(j+2)-TF(j+1))/ZF*((i-1)*hf-
ZF*(j));
        j=j+1;
    end
end
TFF(1,Mp)=TF(NTF(2))+Coef;
ТКК=zeros(1,Mp);% Матрица темп. выхода ИК нагревателя на
полную мощность
j=1;
for i=2:Mp % количество столбцов
    if (i-1)*hf<=Z*j
        ТКК(1,i)=Coef+TK(j)+(TK(j+1)-TK(j))/Z*((i-1)*hf-Z*(j-1));
    elseif j>=NTE(2)-1
    else
        ТКК(1,i)=Coef+TK(j+1)+(TK(j+2)-TK(j+1))/Z*((i-1)*hf-
Z*(j));
        j=j+1;
    end
end
ТКК(1,Mp)=TK(NTE(2))+Coef;
% Преобразование TV1
TVV1=zeros(1,Mp);
j=1;
for i=2:Mp % количество столбцов
    if (i-1)*hf<=Z*j
        TVV1(1,i)=Coef+TV1(j)+(TV1(j+1)-TV1(j))/Z*((i-1)*hf-
Z*(j-1));
    elseif j>=NTE(2)-1

```

```

    else
        TVV1(1,i)=Coef+TV1(j+1)+(TV1(j+2)-TV1(j+1))/Z*((i-
1)*hf-Z*(j));
        j=j+1;
    end
end
TVV1(1,Мр)=TV1(NTE(2))+Coef;
% Преобразование TV2
TVV2=zeros(1,Мр);
j=1;
for i=2:Мр % количество столбцов
    if (i-1)*hf<=Z*j
        TVV2(1,i)=Coef+TV2(j)+(TV2(j+1)-TV2(j))/Z*((i-1)*hf-
Z*(j-1));
    elseif j>=NTE(2)-1
    else
        TVV2(1,i)=Coef+TV2(j+1)+(TV2(j+2)-TV2(j+1))/Z*((i-
1)*hf-Z*(j));
        j=j+1;
    end
end
end
TVV2(1,Мр)=TV2(NTE(2))+Coef;
% Преобразование TP1
TPP1=zeros(1,Мр);
j=1;
for i=2:Мр % количество столбцов
    if (i-1)*hf<=Z*j
        TPP1(1,i)=TP1(j)+(TP1(j+1)-TP1(j))/Z*((i-1)*hf-Z*(j-
1));
    elseif j>=NTE(2)-1
    else
        TPP1(1,i)=TP1(j+1)+(TP1(j+2)-TP1(j+1))/Z*((i-1)*hf-
Z*(j));
        j=j+1;
    end
end
end
TPP1(1,Мр)=TP1(NTE(2));
TPP1(1,1)=TP1(1);
% Преобразование TP2
TPP2=zeros(1,Мр);
j=1;
for i=2:Мр % количество столбцов
    if (i-1)*hf<=Z*j
        TPP2(1,i)=TP2(j)+(TP2(j+1)-TP2(j))/Z*((i-1)*hf-Z*(j-
1));% ГУ на фильтере

```

```

elseif j>=NTE(2)-1
else
    TPP2(1,i)=TP2(j+1)+(TP2(j+2)-TP2(j+1))/Z*((i-1)*hf-
Z*(j));
    j=j+1;
end
end
TPP2(1,Mp)=TP2(NTE(2));
TPP2(1,1)=TP2(1);
Tf=zeros(N,Mp); % Задание матрицы температур
Af=zeros(N,Mp); % Задание матрицы полимеризации
% Задание граничных условий
for i=1:N % количество строк
    Af(i,1)=0;% ГУ на входе
    Tf(i,1)=Tvn+Coef;
end
for exper=1:2 %Цикл для двух экспериментов
% Основной цикл расчета
for i=2:Mp % количество столбцов
    a=zeros(N,N); % Задание матрицы коэффициентов СЛАУ
    % Задание матрицы-строки свободных членов СЛАУ
    b=zeros(1,N);
    for j=2:N-1 % количество строк
        C=Af(j,i-1)/((1-vf)/rorc/crc+vf/rof/cf)+(1-Af(j,i-
1))/((1-vf)/ror/cru+vf/rof/cf);
        a(j,j)=C*U/hf+ktp1*(2*j-1)/(j-1)/tr^2;
        a(j,j+1)=-ktp1*j/(j-1)/tr^2;
        a(j,j-1)=-ktp1/tr^2;
        if Af(j,i-1)>1
            Af(j,i-1)=1;
        else
            end
        DA=((A1*exp(-EA1/Rg/Tf(j,i-1))+A2*exp(-EA2/Rg/Tf(j,i-
1)))*(Af(j,i-1))^n1)*(1-Af(j,i-1))^n2);
        ROO=Af(j,i-1)*rorc+(1-Af(j,i-1))*ror;
        b(j)=ROO*(1-vf)*Htot*DA+C*U/hf*Tf(j,i-1);
        % Условия симметрии
        b(1)=0;
        a(1,1)=1/tr;
        a(1,2)=-1/tr;
        % Температура на фильтере
        if exper==2
            TH=TFF(1,i-1)+tp;
            TVV(1,i-1)=TVV2(1,i-1);
        else

```

```

TH=TKK(1,i);
TVV(1,i-1)=TVV1(1,i-1);
end
APV=0.7*5.67*10^-8*(Tf(N,i-1)^4-TVV(1,i-1)^4)/(Tf(N,i-
1)-TVV(1,i-1));
AP=0.7*5.67*10^-8*(Tf(N,i-1)^4-TH^4)/(Tf(N,i-1)-TH);
b(N)=-AP*TH-APV*TVV(1,i-1);
a(N,N)=-ktpl/tr-AP-APV;
a(N,N-1)=ktpl/tr;
end
u=b/a';
% Заполнение матрицы температур
Tf(1,i)=u(1);
for y=2:N
Tf(y,i)=u(y);
end
clear a b u
% Заполнение матрицы полимеризации
a=zeros(N,N); % Задание матрицы коэффициентов СЛАУ,
% Задание матрицы-строки свободных членов СЛАУ
b=zeros(1,N);
for j=2:N % количество строк
a(j,j)=U/hf;
if Af(j,i-1)>1
    Af(j,i-1)=1;
else
end
b(j)=(A1*exp(-EA1/Rg/Tf(j,i))+A2*exp(-
EA2/Rg/Tf(j,i))*(Af(j,i-1))^n1)*(1-Af(j,i-1))^n2+...
U/hf*Af(j,i-1);
end
% Условия симметрии
b(1)=0;
a(1,1)=-1;
a(1,2)=1;
u=b/a';
% Заполнение матрицы полимеризации
for y=2:N
Af(y,i)=u(y);
end
clear a b u
Af(1,i)=Af(2,i);
Af(N,i)=Af(N-1,i);
if exper==1
EXIT1(i,1)=Tf(1,i)-Coef ;

```

```

else
EXIT2(i,1)=Tf(1,i)-Coef ;
end
end
l=size(Tf); % вычисление размера матрицы температур
k=l(1);
M=l(2);
x2=(R-0)*[0:k-1]/(k-1)+0;
x22=[-fliplr(x2) x2];
x1=Lp*[0:M-1]/(M-1);
TT=[flipud(Tf-Coef);Tf-Coef];
AA=[flipud(Af);Af];
if exper==1
Tf1=Tf;
TT1=TT;
AA1=AA;
else
Tf2=Tf;
TT2=TT;
AA2=AA;
end
end %Конец цикла для двух экспериментов
figure(1)
contourf(x1,x22,TT1);
figure(2)
contourf(x1,x22,AA1);
figure(3)% - График температур эксперимент 1
xp=1:10*NTE(2);
plot(xp,Tf1(1,1:Mp)-Coef,xp,TPP1(1,1:Mp));
grid on;
figure(4)
contourf(x1,x22,TT2);
figure(5)
contourf(x1,x22,AA2);
figure(6)% - График температур эксперимент 2
plot(xp,Tf2(1,1:Mp)-Coef,xp,TPP2(1,1:Mp));
grid on;
dlmwrite('D:\experiment_1.txt', EXIT1, 'delimiter', '\t');
%запись в файл
dlmwrite('D:\experiment_2.txt', EXIT2, 'delimiter', '\t');
%запись в файл

```

### Приложение 3 – текст программы определения давления связующего

```

% Определение давления на двух последовательных конусных
участках и усилия пултрузии
clear all
% Вводные данные
%Свойства волокна
TS=4800; % Линейная плотность ровинга, текс, или г/км(вес 1
км нити)
Nr=15; %Количество ровингов
Rf=12*10^-6; % радиус стекловолокна, м.
rof=2560; % Плотность волокна, кг/м^3
%Свойства связующего
MUk=2400*10^-3; % Вязкость связующего, Па*с
%Геометрия фильеры
R=5.5; % - Конечный радиус формующей фильеры, мм.
FiI=7.97; % - угол наклона 1 конуса фильеры, в градусах.
FiII=1.22; % - угол наклона 2 конуса фильеры, в градусах.
LkI=0.01725; % Длина 1-го конусного участка фильеры, м.
LkII=0.040; % Длина 2-го конусного участка фильеры, м.
%Технологические параметры процесса
U=2/60; %-скорость пултрузии, м/сек.
% Параметр, влияющий на точность решения
N=125; % Число точек вдоль радиуса R.
% Вычисляемые константы (не менять пользователю)
ALFA=degtorad(FiI); % Перевод в радианы угла, заданного в
градусах
GAMMA=degtorad(FiII); % Перевод в радианы угла, заданного в
градусах
R=R/1000; % Радиус стержня в м.
tr=R/(N-1); % Шаг по оси OY по радиусу, м
NI=round(LkI*tan(ALFA)/tr+1); % - Число точек вдоль 1-го
конусного участка фильеры.
NII=round(LkII*tan(GAMMA)/tr+1); % - Число точек вдоль 2-го
конусного участка фильеры.
Vfmax=0.9068; % Константа из выражения Гебарта.
Pvh=101325; % - давление на входе, 101325 Па (атмосферное).
Nf=TS/(1*10^6*rof*pi*Rf^2); %Число нитей
Sf=Nr*Nf*pi*Rf^2; % Площадь, занимаемая волокнами, м^2.
% Определение шага координатной сетки
hkI=LkI/(NI-1); % Шаг по оси OX в 1-м конусе, м
hkII=LkII/(NII-1); % Шаг по оси OX во 2-м конусе, м
R0=LkI*tan(ALFA)+LkII*tan(GAMMA)+R; %Радиус фильеры внешний
большой, м

```

```

RI=R0-LkI*tan(ALFA);
vfR=Sf/(pi*R^2);% Объемное содержание ВОЛОКНА на выходе из
фильеры
vfRI=Sf/(pi*RI^2);% Объемное содержание ВОЛОКНА между
конусными участками
tka=R0-(R0^2-Sf/pi/vfRI)^0.5; %Толщина кольца начальная, м
tanb=(R0-tka)/LkI; %Тангенс угла наклона бетта
tkI=hkI*tan(ALFA); % Шаг по оси OY по радиусу для верхнего
треугольника,м
tkII=hkII*tan(GAMMA);%Шаг по оси OY по радиусу для верхнего
треугольника,м
% Подсчет количества точек, разделяющих области решения
tkrI=NI-1;
if tan(GAMMA)==0
tkrII=0;
else
tkrII=NII-1;
end
%*****
% Определение размерности СЛАУ
clear x
if tan(GAMMA)==0
x=0;
x0=NI+N-1;
for i=1:NI-1
x=x+x0-(i-1);
end
Matr=x+N*NII;% - Размерность СЛАУ, если GAMMA=0
else
x=0;
x0=NI+NII+N-2;
for i=1:NI+NII-1
x=x+x0-(i-1);
end
Matr=x;% - Размерность СЛАУ
end
clear a b
%Задание матрицы коэффициентов СЛАУ, все элементы которой
равны 0
a=zeros(Matr,Matr);
% Задание матрицы-строки свободных членов СЛАУ размерностью
1 x N, все элементы которой равны 0
b=zeros(1,Matr);
% Определение коэффициентов и свободных членов СЛАУ,

```

```

% соответствующих граничным условиям
for j=1:x0; % Граничное условие на входе
    b(j)=Pvh;
    a(j,j)=1;
end
for j=1:N % Граничное условие на выходе
a(Matrx-N+j,Matrx-N+j)=1;
b(Matrx-N+j)=Pvh;
end
% Граничное условие на радиусе
clear s x
for i=2:NI
x=(tkrI+tkrII+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
x=x+1;
b(x)=0;
a(x,x)=-1;
a(x,x+1)=1; % -Условие симметрии на 1-м конусном участке
end
if tan(GAMMA)==0
    x=Matrx-N*NII+1;
    for i=NI+1:NI+NII-2
        x=x+N;
        b(x)=0;
        a(x,x)=-1;
        a(x,x+1)=1; % -Условие симметрии на 2-м конусном участке
    end
else
for i=NI+1:NI+NII-2
x=(tkrI+tkrII+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
x=x+1;
b(x)=0;
a(x,x)=-1;
a(x,x+1)=1; % -Условие симметрии на 2-м конусном участке
end
end
for i=2:NI-1 % Определение граничных условий на криволин.
области I
    x=(tkrI+tkrII+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
    s=-(i-1)+tkrI+tkrII+N;
    x=x+s;
    s2=-(i-2)+tkrI+tkrII+N;
    Vf=vfRI;
    K11=8*Rf^2*(1-Vf)^3/53/Vf^2;
    K22=0.231*(Rf^2)*(((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5);
    b(x)=0;

```



```

a(x,x)=K11*sin(ALFA)/hkI+cos(ALFA)*K22/tkI;
a(x,x-1)=-cos(ALFA)*K22/tkI;
a(x,x-s2)=-K11*sin(ALFA)/hkI;
end
xxx=Matr-N*NII;
for i=NI:NI+NII-1 % Определение граничных условий на
криволин. области II
H=hkII*(NI+NII-i-1)*tan(GAMMA)+R;
Vf=vfR*(R/H)^2;
K11=8*Rf^2*(1-Vf)^3/53/Vf^2;
K22=0.231*(Rf^2)*(((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5);
if tkII==0
xxx=xxx+N;
a(xxx,xxx-1)=-1;
a(xxx,xxx)=1;
b(xxx)=0;
else
x=(tkrI+tkrII+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
s=-(i-1)+tkrI+tkrII+N;
s2=-(i-2)+tkrI+tkrII+N;
x=x+s;
a(x,x)=K11*sin(GAMMA)/hkII+cos(GAMMA)*K22/tkII;
a(x,x-1)=-cos(GAMMA)*K22/tkII;
a(x,x-s2)=-K11*sin(GAMMA)/hkII;
b(x)=0;
end
end
% Определение коэффициентов и свободных членов СЛАУ,
% соответствующих внутренним точкам области
clear x y H H2 s s2
% Первый конусный участок
for i=2:NI-1
x=(tkrI+tkrII+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
tdz=x;
s=tkrI+tkrII+N+1-i;% текущий столбец
s2=s+1;% предыдущий столбец
for j=2:N-1 % Область N
x=x+j;
if (j-1)*tr<=tanb*(LkI-hkI*(i-1))
b(x)=0;
a(x,x-1)=1/(tr^2)-1/(2*(j-1)*(tr^2)); % a
a(x,x-s2)=1/(hkI^2); % b
a(x,x)=-2/(hkI^2)-2/(tr^2); % c
a(x,x+s)=1/(hkI^2); % d
a(x,x+1)=1/(tr^2)+1/(2*(j-1)*(tr^2)); % e

```

```

else
Vf=vfRI;
K11=8*Rf^2*((1-Vf)^3)/53/Vf^2;
K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
b(x)=- (1-Vf)*MUK*U*((R+LkII*tan(GAMMA))*(R0-tka)-2*tr*(j-
1)*...
    ((R+LkII*tan(GAMMA))-tka))/tr/(j-
1)/(((LkI*tka+((R+LkII*tan(GAMMA))-...
    tka)*(i-1)*hkI)^2+((R+LkII*tan(GAMMA))*(R0-tka)-tr*(j-
1)*...
    ((R+LkII*tan(GAMMA))-tka))^2)^0.5);
a(x,x-s2)=K11/(hkI^2);% Pk,m-1
a(x,x+s)=K11/(hkI^2); % Pk,m+1
a(x,x-1)=K22/(tr^2); % Pk-1,m
a(x,x)=-2*K11/hkI^2-(2*j-1)/(j-1)*K22/tr^2; % Pk,m
a(x,x+1)=j/(j-1)*K22/tr^2; % Pk+1,m
end
y=x;
x=tdz;
end % Область N конец
for j=N:tkrII+N-1 % Область II
x=x+j;
if R+(j-N)*tkII<=tanb*(LkI-hkI*(i-1))
Vf=0;
b(x)=0;
a(x,x-1)=1/(tkII^2)-1/(2*(j-1)*(tkII^2)); % a
a(x,x-s2)=1/(hkI^2); % b
a(x,x)=-2/(hkI^2)-2/(tkII^2); % c
a(x,x+s)=1/(hkI^2); % d
a(x,x+1)=1/(tkII^2)+1/(2*(j-1)*(tkII^2)); % e
else
Vf=vfRI;
K11=8*Rf^2*((1-Vf)^3)/53/Vf^2;
K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
b(x)=- (1-Vf)*MUK*U*((R+LkII*tan(GAMMA))*(R0-tka)-2*tkII*(j-
1)*...
    ((R+LkII*tan(GAMMA))-tka))/tkII/(j-
1)/(((LkI*tka+((R+LkII*...
    tan(GAMMA))-tka)*(i-1)*hkI)^2+((R+LkII*tan(GAMMA))*(R0-
tka)-...
    tkII*(j-1)*((R+LkII*tan(GAMMA))-tka))^2)^0.5);
a(x,x-s2)=K11/(hkI^2);% Pk,m-1
a(x,x+s)=K11/(hkI^2); % Pk,m+1
a(x,x-1)=K22/(tkII^2); % Pk-1,m
a(x,x)=-2*K11/hkI^2-(2*j-1)/(j-1)*K22/tkII^2; % Pk,m

```

```

a(x,x+1)=j/(j-1)*K22/tkII^2; % Pk+1,m
end
y=x;
x=tdz;
end % Область средняя конец
for j=tkrII+N:s-1 % Область I
x=x+j;
if R+LkII*tan(GAMMA)+(j-tkrII+N)*tkI<=tanb*(LkI-hkI*(i-1))
b(x)=0;
a(x,x-1)=1/(tkI^2)-1/(2*(j-1)*(tkI^2)); % a
a(x,x-s2)=1/(hkI^2); % b
a(x,x)=-2/(hkI^2)-2/(tkI^2); % c
a(x,x+s)=1/(hkI^2); % d
a(x,x+1)=1/(tkI^2)+1/(2*(j-1)*(tkI^2)); % e
else
Vf=vfRI;
K11=8*Rf^2*((1-Vf)^3)/53/Vf^2;
K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
b(x)=- (1-Vf)*MUK*U*(RI*(R0-tka)-2*tkI*(j-1)*(RI-
tka))/tkI/(j-1)/(((LkI*...
tka+(RI-tka)*(i-1)*hkI)^2+(RI*(R0-tka)-tkI*(j-1)*(RI-
tka))^2)^0.5);
a(x,x-s2)=K11/(hkI^2); % Pk,m-1
a(x,x+s)=K11/(hkI^2); % Pk,m+1
a(x,x-1)=K22/(tkI^2); % Pk-1,m
a(x,x)=-2*K11/hkI^2-(2*j-1)/(j-1)*K22/tkI^2; % Pk,m
a(x,x+1)=j/(j-1)*K22/tkI^2; % Pk+1,m
end
y=x;
x=tdz;
end % Область I конец
x=y+1;
end
% Второй конусный участок
if tan(GAMMA)==0
for i=NI:NI+NII-2
for j=2:N-1
x=Matr-N*NII+j+N*(i-NI);
Vf=vfR;
K11=8*Rf^2*((1-Vf)^3)/53/Vf^2;
K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
a(x,x-1)=K22/(tr^2); % Pk-1,m
a(x,x-N)=K11/(hkII^2); % Pk,m-1
a(x,x)=-2*K11/hkII^2-(1/(j-1)+2)*K22/tr^2; % Pk,m
a(x,x+N)=K11/hkII^2; % Pk,m+1

```

```

a(x,x+1)=(1/(j-1)+1)*K22/tr^2; % Pk+1,m
b(x)=0;
    end
end
else
for i=NI:NI+NII-2
    x=(tkrI+tkrII+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
tdz=x;
    s=tkrI+tkrII+N+1-i;% текущий столбец
    s2=s+1; % предыдущий столбец
    H=hkII*(NI+NII-i-1)*tan(GAMMA)+R;
    Vf=vfR*(R/H)^2;
for j=2:s-1
x=x+j;
if j<=N
a(x,x+s)=(2*cos(GAMMA)-2*(2+Vf)/(1-Vf)*sin(GAMMA)*hkII/H-
cos(GAMMA)*MUK/MUK)*K11/hkII^2; % Pk,m+1
a(x,x-1)=cos(GAMMA)*K22/(tr^2); % Pk-1,m
a(x,x)=(2*(2+Vf)/(1-
Vf)*sin(GAMMA)*hkII/H+cos(GAMMA)*MUK/MUK-
3*cos(GAMMA))*K11/hkII^2-...
(1/(j-1)-MUK/MUK+3)*cos(GAMMA)*K22/tr^2; % Pk,m
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUK/MUK+2)*cos(GAMMA)*K22/tr^2; % Pk+1,m
b(x)=-2*MUK*U*sin(GAMMA)/((H^2+((j-
1)*tr*tan(GAMMA))^2)^0.5);
a(x,x-s2)=cos(GAMMA)*K11/(hkII^2);% Pk,m-1
else
a(x,x+s)=(2*cos(GAMMA)-2*(2+Vf)/(1-Vf)*sin(GAMMA)*hkII/H-
cos(GAMMA)*MUK/MUK)*K11/hkII^2; % Pk,m+1
a(x,x-1)=cos(GAMMA)*K22/(tkII^2); % Pk-1,m
a(x,x)=(2*(2+Vf)/(1-
Vf)*sin(GAMMA)*hkII/H+cos(GAMMA)*MUK/MUK-
3*cos(GAMMA))*K11/hkII^2-...
(1/(j-1)-MUK/MUK+3)*cos(GAMMA)*K22/tkII^2; % Pk,m
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUK/MUK+2)*cos(GAMMA)*K22/tkII^2; %
Pk+1,m
b(x)=-2*MUK*U*sin(GAMMA)/((H^2+((j-
1)*tkII*tan(GAMMA))^2)^0.5);
a(x,x-s2)=cos(GAMMA)*K11/(hkII^2);% Pk,m-1
end
y=x;
x=tdz;
end
x=y+1;
end

```

```

end
% Решение СЛАУ
u=b/a';
% Преобразование вектора-строки значений искомой функции
% в узлах координатной сетки в матрицу размерности NxN,
% удобную для представления результатов
% в графическом виде
G=zeros(NI+NII-1,x0);
kkk=0;
s=0;
for i=1:NI+NII-1

    if tan(GAMMA)==0
        if i<=NI
            s=x0+1-i;
        else
            s=N;
        end
    else
        s=x0+1-i;
    end
for j=kkk+1:kkk+s
    G(i,j-kkk)=u(j);
end
    kkk=s+kkk;
end
P=rot90(G);
PS=flipud(P);
x1=(LkI+LkII)*[0:NI+NII-2]/(NI+NII-2);
x2=R0*[0:x0-1]/(x0-1);

figure(1)% - Поле давления связующего
contourf(x1,x2,PS,20);
figure(2)% - График давления связующего в первой конусной
части фильеры
xp=hkI*[0:NI];
plot(xp,PS(1,1:NI+1),'LineWidth',2);
grid on;
PkI=zeros(x0,NI);
for i=1:NI
for j=1:x0
PkI(j,i)= PS(j,i);
end
end
figure(3); % - Поле давления для первого конуса

```

```

x1=LkI*[0:NI-1]/(NI-1);
x2=R0*[0:x0-1]/(x0-1);
contourf(x1,x2,PkI,50);
PkII=zeros(x0,NII);
for i=1:NII
for j=1:x0
PkII(j,i)= PS(j,i+NI-1);
end
end
figure(4)% - График давления связующего во втором конусе
xp=hkII*[1:NII];
plot(xp,PS(1,NI:NI+NII-1),'LineWidth',2);
grid on;
figure(5); % - Поле давления для второго конуса
x1=LkII*[0:NII-1]/(NII-1);
x2=R0*[0:x0-1]/(x0-1);
contourf(x1,x2,PkII,50);

% Определение усилия пултрузии
%---Определение усилия пултрузии в I конусе-----
Sfull=0;
N1=0;
N2=0;
NkI=0;
NkII=0;
for i=1:NI
H=hkII*(NI+NII-i-1)*tan(GAMMA)+R;% Высота текущего сечения,
м
Vf=vfRI;
RFT=Rf*(1-0.5*((3)^0.5*pi*Vf/2)^0.5);% Толщина пленки
наполнителя, м
s=i;
Sbok=pi()*hkI/cos(ALFA)*(2*RI+(2*NI-1-2*i)*tkI);% площадь
% боковой пов-ти конуса на участке в м^2
Sfull=Sfull+Sbok;
NP=sin(ALFA)*PS(x0-s+1,i)*Sbok/10000; %сила на участке,в т.
% от сжатия пучка в конусе
N1=N1+NP; % суммарная сила на конусном участке от сжатия
пучка в конусе,
% в тоннах.
NVISC=U/RFT*Sbok*MUk/10000;
%сила на конусном участке от вязкого трения в тоннах
N2=N2+NVISC;%суммарная сила на конусном участке от вязкого
усилия
% в тоннах

```

```

end
NprI=N1+N2;
%---Определение усилия пултрузии во II конусе-----
N1=0;
N2=0;
for i=NI+1:NI+NII-1
H=hkII*(NI+NII-i-1)*tan(GAMMA)+R;% Высота текущего сечения,
м
Vf=vfR*R^2/H^2;% значение содержания волокна на участке
RFT=Rf*(1-0.5*((3)^0.5*pi*Vf/2)^0.5);% Толщина пленки
наполнителя, м
s=i;
Sbok=pi()*hkII/cos(GAMMA)*(2*R+(2*(NI+NII)-1-2*i)*tkII);%
площадь
% боковой пов-ти конуса на участке в м^2
Sfull=Sfull+Sbok;
if tan(GAMMA)==0
NP=0;
else
NP=sin(ALFA)*PS(x0-s+1,i)*Sbok/10000;%сила на участке,в т.
% от сжатия пучка в конусе
end
N1=N1+NP;% суммарная сила на конусном участке от сжатия
пучка в конусе,
% в тоннах.
NVISC=U/RFT*Sbok*MUk/10000;
%сила на конусном участке от вязкого трения в тоннах
N2=N2+NVISC;%суммарная сила на конусном участке от вязкого
усилия в тоннах
end
NprII=N1+N2;
Nsum=NprI+NprII %Суммарное усилие пултрузии в тоннах

```

**Приложение 4 – программа по моделированию пултрузии**

```

% Программа по моделированию Пултрузии
%Свойства волокна
Rf=13*10^-6; % радиус стекловолокна, м.
rof=2.56*10^6; % Плотность волокна, г/м^3
cf=0.84; % Удельная теплоемкость волокна, Дж/(г*С)
ktpf=1.1; % Коэффициент теплопроводности волокна, Вт/(м*К)
%Свойства связующего
roru=1.055*10^6; % Плотность жидкой смолы, г/м^3
rorc=1.27*10^6; % Плотность отвержденной смолы, г/м^3
cru=1.69; % Удельная теплоемкость жидкого связующего,
Дж/(г*С)
src=cru-0.33; % Удельная теплоемкость отвержденного
связующего, Дж/(г*С)
ktpr=0.25; % Коэффициент теплопроводности связующего,
Вт/(м*К)
% Блок задания констант
Pvh=101325;% - давление на входе, Па.
alfa=35; % - угол наклона конуса фильеры.
U=0.15/60; %-скорость пултрузии, м/сек.
R=8; % - Радиус фильеры,мм.
RD=0;% - Радиус дорна,м.
N=80; % Число точек вдоль радиуса R.
Mk=90; % - Число точек вдоль конусного участка фильеры.
Mf=90; % - Число точек вдоль прямого участка фильеры
Mv=90; % - Число точек вдоль уч. после выхода из фильеры
Lk=0.018;% Длина конусного участка фильеры, м.
Lf=1; % - Длина фильеры, м.
Lv=5; % - Длина участка после фильеры, м.
vf=0.6;% Объемное содержание наполнителя конечного продукта
Ematr=3447; %Модуль упругости отвердевшей смолы, МПа
Esteklo=7.308*(10^4);
MUmatr=0.35; %к-т Пуассона отвердевшей смолы
MUsteklo=0.22; %к-т Пуассона стекловолокна
cd=0.444; % Удельная теплоемкость материала дорна, Дж/(г*С)
rod=7.8*10^6; % Плотность материала дорна, г/м^3
KTRf=5.04*10^-6; %1/0С для стекловолокна
KTRr=57.6*10^-6; %1/0С для связующего
NI=-0.05; % Хим. усадка, объемная
Vfmax=0.9068; % Константа из выражения Гебарта.
Rg=8.31; % Rg - универсальная газовая постоянная,
LA=4*vf/pi;
RLA = ((1-LA^2)^-0.5)*atan(((1+LA)/(1-LA))^0.5)-pi/4;
km=45; % Коэффициент перед ст.п. для вязкости

```



```

mub=7.59*10^-12; % к-т для вязкости
Eg=64061; %j/mol к-т для вязкости
Coef=273;
Ac=0.95;% критерий готового изделия
Ntr=0.3;% коэффициент трения
TF=[150,170,170,170,170,150,145,145,145,145,145,145];
T0=25;% Температура на входе, градус цельсия.
ТКК= T0;
ТК=[ТКК,ТКК,ТКК,ТКК,ТКК,ТКК,ТКК,ТКК,ТКК,ТКК,ТКК]; %
температурный режим на конусе фильеры;
Tvn=25;% Температура окружающей среды, градус цельсия.
ga=14; %Коэффициент теплопередачи между окр. средой и
стержнем
Pv=Pvh; % Внеш. давл. на стержень после его вых. из фильеры
a0=0; % степень полимеризации на входе.
ktp1=1/(vf/ktpf+(1-vf)/ktp); % коэф.тепл. в напр. r,
кинетические константы
A1=10^8.54;% 1/s(#1)
A2=10^8.752;% 1/s
A3=0;% 1/s
EA1=88300;% Эффективная энергия активации процесса, Дж/Моль
EA2=88300;% Эффективная энергия активации процесса, Дж/Моль
EA3=0;% Эффективная энергия активации процесса, Дж/Моль
n1=1; %порядок реакции
n2=1.2; %порядок реакции
Htot=241.13; % теплота реакции полимеризации, Дж/г
% Блок некоторых вычисляемых констант
R=R/1000; % Радиус стержня в м.
ALFA=degtorad(alfa); % Перевод в рад. угла
NTK=size(ТК); %Число точек температур в матрице ТК;
NTF=size(TF); %Число точек температур в матрице TF;
ZK=Lk/(NTK(2)-1); % Диапазон м/у точками темп. для конуса;
Z=Lf/(NTF(2)-1); % Диап. м/у точками темп. для фильеры;
% Определение шага координатной сетки
hk=Lk/(Mk-1); % Шаг по оси OX в конусе, м
hf=Lf/(Mf-1); % Шаг по оси OX в фильере, м
hv=Lv/(Mv-1); % Шаг по оси OX после выхода из фильеры, м
t=hk*tan(ALFA); % мелкий шаг по оси OY для конуса, м
tr=R/(N-1); % Шаг по оси OY по радиусу, м
R0=Lk*tan(ALFA)+R; %Радиус фильеры внешний большой,м
Rp=1.1*R %Радиус отв. формующей пластины.
% Подсчет кол-ва точек, приход. на криволинейную область
tkr=round((R0-R)/t);
% Подсчет номера точки разрыва границы области волокна от
области смолы по оси r

```

```

kint=round((Rp-R)/t)+N;
% Подсчет номера точки разрыва границы криволинейной
% области по оси x
m1=tkr+1+N-1-kint;
% Вычисление температур и степени полимеризации %
Tk=zeros(N+tkr,Mk); % Задание матрицы температур
Ak=zeros(N+tkr,Mk); % Задание матрицы полимеризации
% Задание граничных условий
for i=1:m1 % количество столбцов
    x=0;
    s=N+tkr-(i-1);
    x=x+s;
for j=1:x % количество строк
    Ak(j,i)=a0;% ПУ на входе
    Tk(j,i)=T0+Coef;
end
end
j=1;
for i=2:Mk % количество столбцов
    x=0;
    s=N+tkr-(i-1);
    x=x+s;
    if (i-1)*hk<=ZK*j
        Tk(x,i)=Coef+TK(j)+(TK(j+1)-TK(j))/ZK*((i-1)*hk-
ZK*(j-1));% ПУ на фильтере
    elseif j>=NTK(2)-1
    else
        Tk(x,i)=Coef+TK(j+1)+(TK(j+2)-TK(j+1))/ZK*((i-1)*hk-
ZK*(j));
        j=j+1;
    end
end
end
Tk(N,Mk)=TK(NTK(2))+Coef;
for i=m1+1:Mk % количество столбцов
    x=0;
    x=N+tkr-(i-1);
    a=zeros(x,x);
    b=zeros(1,x);
    H=R+(Lk-(i-1)*hk)*tan(ALFA);
    for j=2:x-1 % количество строк
        if j<=N
            vx=U*(R0-(i-1)*hk*tan(ALFA))/(((R0-(i-
1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-1)*tr*tan(ALFA))^2))^0.5; %Скорость
            ВДОЛЬ X

```

```

vr=-U*((j-1)*tr*tan(ALFA))/(((R0-(i-
1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-1)*tr*tan(ALFA))^2))^0.5;
%Скорость по радиусу
C=Ak(j,i-1)/((1-
vf*R^2/H^2)/rorc/crc+vf*R^2/H^2/rof/cf)+(1-Ak(j,i-1))/((1-
vf*R^2/H^2)/roru/cru+vf*R^2/H^2/rof/cf);
a(j,j)=C*(vx/hk-vr/tr)+ktp1*(2*j-1)/(j-1)/tr^2;
a(j,j+1)=C*vr/tr-ktp1*j/(j-1)/tr^2;
a(j,j-1)=-ktp1/tr^2;
% Условия симметрии
b(1)=0;
a(1,1)=-1/tr;
a(1,2)=1/tr;
else
vx=U*(R0-(i-1)*hk*tan(ALFA))/(((R0-(i-
1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-1)*t*tan(ALFA))^2))^0.5;          vr=-
U*((j-1)*t*tan(ALFA))/(((R0-(i-1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-
1)*t*tan(ALFA))^2))^0.5;
C=Ak(j,i-1)/((1-
vf*R^2/H^2)/rorc/crc+vf*R^2/H^2/rof/cf)+(1-Ak(j,i-1))/((1-
vf*R^2/H^2)/roru/cru+vf*R^2/H^2/rof/cf);
a(j,j)=C*(vx/hk-vr/t)+ktp1*(2*j-1)/(j-1)/t^2;
a(j,j+1)=C*vr/t-ktp1*j/(j-1)/t^2;
a(j,j-1)=-ktp1/t^2;
% Условия симметрии
b(1)=0;
a(1,1)=-1/t;
a(1,2)=1/t;
end
DA=((A1*exp(-EA1/Rg/Tk(j,i-1))+A2*exp(-EA2/Rg/Tk(j,i-
1)))*(Ak(j,i-1))^n1*(1-Ak(j,i-1))^n2);
ROO=Ak(j,i-1)*rorc+(1-Ak(j,i-1))*roru;
b(j)=ROO*(1-vf*R^2/H^2)*Htot*DA+C*vx/hk*Tk(j,i-1);
% Температура на конусе фильеры
b(x)=Tk(x,i);
a(x,x)=1;
end
u=b/a';
% Заполнение матрицы температур
Tk(1,i)=u(1);
for y=2:x-1
Tk(y,i)=u(y);
end
clear a b u
% Заполнение матрицы полимеризации

```

```

% Задание матрицы коэффициентов СЛАУ,
% все элементы которой равны 0
a=zeros(x,x);
% Задание матрицы-строки свободных членов СЛАУ
размерностью 1 x N, все элементы которой равны 0
b=zeros(1,x);
for j=2:x-1 % количество строк
if j<=N
vx=U*(R0-(i-1)*hk*tan(ALFA))/(((R0-(i-
1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-1)*tr*tan(ALFA))^2))^0.5;
vr=-U*((j-1)*tr*tan(ALFA))/(((R0-(i-
1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-1)*tr*tan(ALFA))^2))^0.5;
a(j,j)=vx/hk-vr/tr;
a(j,j+1)=vr/tr;
a(x,x)=vx*(1/hk-1/tr*tan(ALFA));
a(x,x-1)=vx/tr*tan(ALFA);
else
vx=U*(R0-(i-1)*hk*tan(ALFA))/(((R0-(i-
1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-1)*t*tan(ALFA))^2))^0.5;
vr=-U*((j-1)*t*tan(ALFA))/(((R0-(i-
1)*hk*tan(ALFA))^2+((j-1)*t*tan(ALFA))^2))^0.5;
a(j,j)=vx/hk-vr/t;
a(j,j+1)=vr/t;
a(x,x)=vx*(1/hk-1/t*tan(ALFA));
a(x,x-1)=vx/t*tan(ALFA);
end
b(j)=(A1*exp(-EA1/Rg/Tk(j,i))+A2*exp(-
EA2/Rg/Tk(j,i))*(Ak(j,i-1))^n1*(1-Ak(j,i-1))^n2+...
vx/hk*Ak(j,i-1);
b(x)=(A1*exp(-EA1/Rg/Tk(x,i))+A2*exp(-
EA2/Rg/Tk(x,i))*(Ak(x,i-1))^n1*(1-Ak(x,i-1))^n2+...
vx/hk*Ak(x,i-1);
end
% Условия симметрии
b(1)=0;
a(1,1)=1;
a(1,2)=-1;
u=b/a';
% Заполнение матрицы полимеризации
for y=2:x
Ak(y,i)=u(y);
end
clear a b u
Ak(1,i)=Ak(2,i);
end

```

```

l=size(Tk); % вычисление размера матрицы температур
k=l(1);
M=l(2);
x2=(R0-0)*[0:k-1]/(k-1)+0;
x22=[-fliplr(x2) x2];
x1=Lk*[0:M-1]/(M-1);
TT=[flipud(Tk-Coef);Tk-Coef];
AA=[flipud(Ak);Ak];
Turoven=[0:5:210];
Auroven=[0:0.05:1];
figure(1)
contourf(x1,x22,TT,Turoven);
figure(2)
contourf(x1,x22,AA,Auroven);
%Блок второй, прямой участок фильеры
Tf=zeros(N,Mf); % Задание матрицы температур
Af=zeros(N,Mf); % Задание матрицы полимеризации
for i=1:N % количество строк
    if i<round(RD/tr+1)
        %Af(i,1)=1;
        Af(i,1)=Ak(i,Mk);
        Tf(i,1)=Tk(i,Mk);
        % ГУ на входе
    else
        Af(i,1)=Ak(i,Mk);
        Tf(i,1)=Tk(i,Mk);
    end
end
j=1;
for i=1:N % количество строк
    %Af(i,1)=Ak(i,Mk);
    if i<round(RD/tr+1)
        Af(i,1)=1;
        % ГУ на входе
    else
        Af(i,1)=0;
    end
    Tf(i,1)=T0+273;
end
for i=2:Mf % количество столбцов
    if (i-1)*hf<=Z*j
        Tf(N,i)=Coef+TF(j)+(TF(j+1)-TF(j))/Z*((i-1)*hf-Z*(j-
1));% ГУ на фильере
    elseif j>=NTF(2)-1
    else

```

```

    Tf(N,i)=Coef+TF(j+1)+(TF(j+2)-TF(j+1))/Z*((i-1)*hf-
Z*(j));
    j=j+1;
end
end
Tf(N,Mf)=TF(NTF(2))+Coef;
ktp11=ktp1; %Сохранение в памяти величин
Htot1=Htot; %Сохранение в памяти величин
% Основной цикл расчета
for i=2:Mf % количество столбцов
    a=zeros(N,N);
    b=zeros(1,N);
    for j=2:N-1 % количество строк
        if j>round(RD/tr+1)
            ktp1=ktp11;
            Htot=Htot1;
            ROr=rorc*Af(j,i-1)+(1-Af(j,i-1))*roru;
            ROC=(1-vf)*ROr+vf*rof; %Плотность системы
            CPr=crc*Af(j,i-1)+(1-Af(j,i-1))*cru;
            C=ROC*((1-vf)*CPr+vf*cf); % объемная теплоемкость
        else
            ktp1=47;
            Htot=0;
            ROr=rod;
            end
        a(j,j)=C*U/hf+ktp1*(2*j-1)/(j-1)/tr^2;
        a(j,j+1)=-ktp1*j/(j-1)/tr^2;
        a(j,j-1)=-ktp1/tr^2;
            if Af(j,i-1)>1
                Af(j,i-1)=1;
            else
            end
        DA=((A1*exp(-EA1/Rg/Tf(j,i-1))+A2*exp(-EA2/Rg/Tf(j,i-
1)))*(Af(j,i-1))^n1)*(1-Af(j,i-1))^n2);
        b(j)=ROr*(1-vf)*Htot*DA+C*U/hf*Tf(j,i-1);
        % Условия симметрии
        b(1)=0;
        a(1,1)=-1/tr;
        a(1,2)=1/tr;
        % Температура на фильтере
        b(N)=Tf(N,i);
        a(N,N)=1;
    end
    u=b/a';
    % Заполнение матрицы температур

```

```

Tf(1,i)=u(1);
for y=2:N-1
Tf(y,i)=u(y);
end
clear a b u
a=zeros(N,N);
b=zeros(1,N);
for j=2:N % количество строк
a(j,j)=U/hf;
if Af(j,i-1)>1
Af(j,i-1)=1;
else
end
b(j)=(A1*exp(-EA1/Rg/Tf(j,i))+A2*exp(-
EA2/Rg/Tf(j,i))*(Af(j,i-1))^n1)*(1-Af(j,i-1))^n2+...
U/hf*Af(j,i-1);
end
% Условия симметрии
b(1)=0;
a(1,1)=-1;
a(1,2)=1;
u=b/a';
% Заполнение матрицы полимеризации
for y=2:N
Af(y,i)=u(y);
end
clear a b u
Af(1,i)=Af(2,i);
end
l=size(Tf); % вычисление размера матрицы температур
k=l(1);
M=l(2);
x2=(R-0)*[0:k-1]/(k-1)+0;
x22=[-fliplr(x2) x2];
x1=Lf*[0:M-1]/(M-1);
TT=[flipud(Tf-Coef);Tf-Coef];
AA=[flipud(Af);Af];
Turoven=[0:5:210];
Auroven=[0:0.05:0.95];
figure(3)
contourf(x1,x22,TT,Turoven);
figure(4)
contourf(x1,x22,AA,Auroven);
FDF=zeros(1,N);
for mkl=1:N

```

```

    FDF(1,mk1)=Af(mk1,Mf);
end
min(abs(FDF(:)))
%Блок третий, выход изделия из фильеры
Tv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы температур
Av=zeros(N,Mv); % Задание матрицы полимеризации
for i=1:N % количество строк
    Av(i,1)=Af(i,Mf); % ГУ на входе
    Tv(i,1)=Tf(i,Mf);
end
% Основной цикл расчета
for i=2:Mv % количество столбцов
    a=zeros(N,N);
    b=zeros(1,N);
    for j=2:N-1 % количество строк
        ROr=rorc*Av(j,i-1)+(1-Av(j,i-1))*roru;
        ROC=(1-vf)*ROr+vf*rof;
        CPr=crc*Av(j,i-1)+(1-Av(j,i-1))*cru;
        C=ROC*((1-vf)*CPr+vf*cf);
        a(j,j)=C*(U/hv)+ktpl*(2*j-1)/(j-1)/tr^2;
        a(j,j+1)=-ktpl*j/(j-1)/tr^2;
        a(j,j-1)=-ktpl/tr^2;
        if Av(j,i-1)>1
            Av(j,i-1)=1;
        else
            end
        DA=((A1*exp(-EA1/Rg/Tv(j,i-1))+A2*exp(-EA2/Rg/Tv(j,i-1)))*
        (Av(j,i-1))^n1*(1-Av(j,i-1))^n2);
        b(j)=ROr*(1-vf)*Htot*DA+C*U/hv*Tv(j,i-1);
        % Условия симметрии
        b(1)=0;
        a(1,1)=-1/tr;
        a(1,2)=1/tr;
        % Температура на фильере
        b(N)=ga/ktpl*(Tvn+Coef);
        a(N,N)=1/tr+ga/ktpl;
        a(N,N-1)=-1/tr;
    end
    u=b/a';
    % Заполнение матрицы температур
    Tv(1,i)=u(1);
    for y=2:N
        Tv(y,i)=u(y);
    end
    clear a b u

```



```

a=zeros(N,N);
b=zeros(1,N);
for j=2:N % количество строк
a(j,j)=U/hv;
a(j,j+1)=0;
if Av(j,i-1)>1
    Av(j,i-1)=1;
else
end
b(j)=(A1*exp(-EA1/Rg/Tv(j,i))+A2*exp(-
EA2/Rg/Tv(j,i))*(Av(j,i-1))^n1)*(1-Av(j,i-1))^n2+...
U/hv*Av(j,i-1);
a(N,N)=U/hv;
a(N,N-1)=0;
if Av(N,i-1)>1
    Av(N,i-1)=1;
else
end
b(N)=(A1*exp(-EA1/Rg/Tv(N,i))+A2*exp(-
EA2/Rg/Tv(N,i))*(Av(N,i-1))^n1)*(1-Av(N,i-1))^n2+...
U/hv*Av(N,i-1);
end
% Условия симметрии
b(1)=0;
a(1,1)=-1;
a(1,2)=1;
u=b/a';
% Заполнение матрицы полимеризации
for y=2:N
Av(y,i)=u(y);
end
clear a b u
Av(1,i)=Av(2,i);
end
l=size(Tv); % вычисление размера матрицы температур
k=l(1);
M=l(2);
x2=(R-0)*[0:k-1]/(k-1)+0;
x22=[-fliplr(x2) x2];
x1=Lv*[0:Mv-1]/(Mv-1);
TT=[flipud(Tv-Coef);Tv-Coef];
AA=[flipud(Av);Av];
Turoven=[0:5:210];
Auroven=[0:0.05:1];
figure(5)

```

```

contourf(x1,x22,ТТ,Turoven);
figure(6)
contourf(x1,x22,АА,Auroven);
%Блок определения давления связующего
% Задание матрицы вязкости, для зоны конуса I
l=size(Tk); % вычисление размера матрицы температур конуса
MUK=zeros(l(1),l(2)); % создана нулевая матрица вязкости
для конуса
for i=1:Mk % Заполнение матрицы вязкости
    for j=1:l(1)
        if Ak(j,i)>1
            Ak(j,i)=1;
        else
            end
            MUK(j,i)=mub*exp(Eg/(Rg*Tk(j,i))+km*Ak(j,i));
        end
    end
end
% Задание матрицы вязкости, для зоны фильеры
l=size(Tf); % вычисление размера матрицы температур зоны
фильеры
MUF=zeros(l(1),l(2)); % создана нулевая матрица вязкости
для фильеры
for i=1:Mf % Заполнение матрицы вязкости
    for j=1:l(1)
        if Af(j,i)>1
            Af(j,i)=1;
        else
            end
            MUF(j,i)=mub*exp(Eg/(Rg*Tf(j,i))+km*Af(j,i));
        end
    end
end
% Задание матрицы вязкости, для зоны выхода из фильеры
l=size(Tv); % вычисление размера матрицы температур
MUV=zeros(l(1),l(2)); % создана нулевая матрица вязкости
for i=1:Mv % Заполнение матрицы вязкости
    for j=1:l(1)
        if Av(j,i)>1
            Av(j,i)=1;
        else
            end
            MUV(j,i)=mub*exp(Eg/(Rg*Tv(j,i))+km*Av(j,i));
        end
    end
end
% Определение размерности СЛАУ
clear x

```

```

x=0;
for i=1:Mk-1
H=R0-(i-1)*hk*tan(ALFA)-R;
s=round(H/t);
x=x+s;
end
Matr=N*(Mf+Mv+Mk-2)+x;% - Размерность СЛАУ
clear a b
% Задание матрицы коэффициентов СЛАУ,
% все элементы которой равны 0
a=zeros(Matr,Matr);
% Задание матрицы-строки свободных членов СЛАУ размерностью
1 x N,
% все элементы которой равны 0
b=zeros(1,Matr);
% Определение коэффициентов и свободных членов СЛАУ,
% соответствующих граничным условиям
for j=1:tkr+N % Граничное условие на входе
    b(j)=Pvh;
a(j,j)=1;
end
for j=1:N % Граничное условие на выходе
a(Matr-N+j,Matr-N+j)=1;
b(Matr-N+j)=Pvh;
end
% Граничное условие на радиусе
clear s x
for i=2:Mk
x=(tkr+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
x=x+1;
b(x)=0;
a(x,x)=-1;
a(x,x+1)=1; % -Условие симметрии на конусном
участке,включая точку Mk
end
w=Mf+Mv-1;
for i=Mk+1:Mk+w-2
    x=N+x;
b(x)=0;
a(x,x)=-1;
a(x,x+1)=1; % -Условие симметрии на остальных точках
радиуса
end
% Определение граничных условий на криволин. области для
зоны backflow

```

```

clear x s s2 H H2
for i=2:m1-1
x=(tkr+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
s=-(i-1)+tkr+N;
s2=-(i-2)+tkr+N;
x=x+s;
b(x)=0;
a(x,x)=sin(ALFA)/hk+cos(ALFA)/t;
a(x,x-1)=-cos(ALFA)/t;
a(x,x-s2)=-sin(ALFA)/hk;
end
clear s s2 H H2
for i=m1:Mk-1 % Определение граничных условий на криволин.
области для Tapered
    x=(tkr+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
s=-(i-1)+tkr+N;
x=x+s;
s2=-(i-2)+tkr+N;
H=(s-1)*t;
    Vf=vf*((N-1)/(s-1))^2;
    K11=8*Rf^2*(1-Vf)^3/53/Vf^2;
    K22=0.231*(Rf^2)*(((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5);
    b(x)=0;
a(x,x)=K11*sin(ALFA)/hk+cos(ALFA)*K22/t;
a(x,x-1)=-cos(ALFA)*K22/t;
a(x,x-s2)=-K11*sin(ALFA)/hk;
end
% Граничное условие на прямом участке фильеры
clear x
for i=1:Mf+Mv-2
    x=Matr-N*w+N*i;
b(x)=0;
a(x,x-1)=-1;
a(x,x)=1;
end
clear s s2 H H2
% Определение коэффициентов и свободных членов СЛАУ,
% соответствующих внутренним точкам области
% backflow section
clear x
for i=2:m1-1
x=(tkr+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
tdz=x;
s=-1-(i-1)+tkr+1+N;
s2=-1-(i-2)+tkr+1+N;

```

```

for j=kint+1:s-1
x=x+j; % Считаем, что точки на линии волокна не относятся к
зоне смолы
a(x,x-1)=1/t^2; % Pk-1,m
a(x,x-s2)=1/hk^2;% Pk,m-1
a(x,x)=(MUK(j,i+1)/MUK(j,i)-3)/hk^2-...
    (1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+3)/t^2; % Pk,m
a(x,x+s)=(2-MUK(j,i+1)/MUK(j,i))/hk^2; % Pk,m+1
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+2)/t^2; % Pk+1,m
b(x)=0;
y=x;
x=tdz;
end
x=y+1;
end
clear x y H H2 s s2
% Strength fibre section
Vf=vf*((N-1)/(kint-1))^2;
K11=8*Rf^2*(1-Vf)^3/53/Vf^2;
K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
for i=2:m1-1
x=(tkr+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
tdz=x;
s=-(i-1)+tkr+N;
s2=s+1;
for j=2:kint
x=x+j;
a(x,x-s2)=K11/(hk^2);% Pk,m-1
a(x,x+s)=(2-MUK(j,i+1)/MUK(j,i))*K11/hk^2; % Pk,m+1
if j<=N
a(x,x-1)=K22/(tr^2); % Pk-1,m
a(x,x)=(MUK(j,i+1)/MUK(j,i)-3)*K11/hk^2-...
    (1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+3)*K22/tr^2; % Pk,m
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+2)*K22/tr^2; %
Pk+1,m
else
a(x,x-1)=K22/(t^2); % Pk-1,m
a(x,x)=(MUK(j,i+1)/MUK(j,i)-3)*K11/hk^2-...
    (1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+3)*K22/t^2; % Pk,m
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+2)*K22/t^2; % Pk+1,m
end
b(x)=0;
y=x;
x=tdz;
end

```

```

x=y+1;
end
clear x y H H2 s s2
% Tapered section
for i=m1:Mk-1
    x=(tkr+N)*(i-1)-0.5*(i-2)*(i-1);
tdz=x;
    s=N+tkr+1-i;% текущий столбец
    s2=s+1;% предыдущий столбец
    Vf=vf*((N-1)/(s-1))^2;
    K11=8*Rf^2*((1-Vf)^3)/53/Vf^2;
    K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
for j=2:s-1
x=x+j;
a(x,x-s2)=cos(ALFA)*K11/(hk^2);% Pk,m-1
if j<=N
H=(s-1)*tr;
a(x,x+s)=(2*cos(ALFA)-2*(2+Vf)/(1-Vf)*sin(ALFA)*hk/H-
cos(ALFA)*MUK(j,i+1)/MUK(j,i))*K11/hk^2;% Pk,m+1
a(x,x-1)=cos(ALFA)*K22/(tr^2);% Pk-1,m
a(x,x)=(2*(2+Vf)/(1-
Vf)*sin(ALFA)*hk/H+cos(ALFA)*MUK(j,i+1)/MUK(j,i)-
3*cos(ALFA))*K11/hk^2-...
(1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+3)*cos(ALFA)*K22/tr^2;%
Pk,m
a(x,x+1)=(1/(j-1)-
MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+2)*cos(ALFA)*K22/tr^2;% Pk+1,m
b(x)=-2*MUK(j,i)*U*sin(ALFA)/((H^2+((j-
1)*tr*tan(ALFA))^2)^0.5);
else
H=(s-1)*t;
a(x,x+s)=(2*cos(ALFA)-2*(2+Vf)/(1-Vf)*sin(ALFA)*hk/H-
cos(ALFA)*MUK(j,i+1)/MUK(j,i))*K11/hk^2;% Pk,m+1
a(x,x-1)=cos(ALFA)*K22/(t^2);% Pk-1,m
a(x,x)=(2*(2+Vf)/(1-
Vf)*sin(ALFA)*hk/H+cos(ALFA)*MUK(j,i+1)/MUK(j,i)-
3*cos(ALFA))*K11/hk^2-...
(1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+3)*cos(ALFA)*K22/t^2;%
Pk,m
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUK(j+1,i)/MUK(j,i)+2)*cos(ALFA)*K22/t^2;
% Pk+1,m
b(x)=-2*MUK(j,i)*U*sin(ALFA)/((H^2+((j-
1)*t*tan(ALFA))^2)^0.5);
end
y=x;

```

```

x=tdz;
end
x=y+1;
end
% Strength Die section
clear x y H H2 s s2
for i=Mk:Mk+Mf-2
    for j=2:N-1
        x=Matr-N*(Mf+Mv-1)+j+N*(i-Mk);
        if Af(j,i+1-Mk)>0.95
            b(x)=Pvh;
            a(x,x)=1;
        else
            Vf=vf;
            K11=8*Rf^2*((1-Vf)^3)/53/Vf^2;
            K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
a(x,x-1)=K22/(tr^2); % Pk-1,m
a(x,x-N)=K11/(hf^2);% Pk,m-1
a(x,x)=(MUf(j,i+1+1-Mk)/MUf(j,i+1-Mk)-3)*K11/hf^2-...
    (1/(j-1)-MUf(j+1,i+1-Mk)/MUf(j,i+1-Mk)+3)*K22/tr^2; %
Pk,m
a(x,x+N)=(2-MUf(j,i+1+1-Mk)/MUf(j,i+1-Mk))*K11/hf^2; %
Pk,m+1
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUf(j+1,i+1-Mk)/MUf(j,i+1-
Mk)+2)*K22/tr^2; % Pk+1,m
b(x)=0;
        end
    end
end
for i=Mk+Mf-1:Mk+Mf+Mv-3
    for j=2:N-1
        x=Matr-N*(Mf+Mv-1)+j+N*(i-Mk);
        if Av(j,i+2-Mk-Mf)>0.95
            b(x)=Pvh;
            a(x,x)=1;
        else
            Vf=vf;
            K11=8*Rf^2*((1-Vf)^3)/53/Vf^2;
            K22=0.231*Rf^2*((Vfmax/Vf)^0.5-1)^2.5;
a(x,x-1)=K22/(tr^2); % Pk-1,m
a(x,x-N)=K11/(hv^2);% Pk,m-1
a(x,x)=(MUv(j,i+1+2-Mk-Mf)/MUv(j,i+2-Mk-Mf)-3)*K11/hv^2-...
    (1/(j-1)-MUv(j+1,i+2-Mk-Mf)/MUv(j,i+2-Mk-
Mf)+3)*K22/tr^2; % Pk,m

```

```

a(x,x+N)=(2-MUv(j,i+1+2-Mk-Mf)/MUv(j,i+2-Mk-Mf))*K11/hv^2;
% Pk,m+1
a(x,x+1)=(1/(j-1)-MUv(j+1,i+2-Mk-Mf)/MUv(j,i+2-Mk-
Mf)+2)*K22/tr^2; % Pk+1,m
b(x)=0;
    end
end
    end
% Решение СЛАУ
u=b/a';
G=zeros(Mk+w-1,N+tkr);
kkk=0;
s=0;
for i=1:Mk+w-1
    if i<=Mk
        s=N+tkr+1-i;
    else
        s=N;
    end
for j=kkk+1:kkk+s
    G(i,j-kkk)=u(j);
end
    kkk=s+kkk;
end
P=rot90(G);
PS=flipud(P);
x1=(Lv+Lf+Lk)*[0:Mk+w-2]/(Mk+w-1);
x2=R0*[0:N+tkr-1]/(N+tkr-1);
xnew=hf*[0:w];
figure(7)
contourf(x1,x2,PS,20);
figure(8)% - График давления связующего в конусной части
фильеры
xp=hk*[0:Mk];
plot(xp,PS(1,1:Mk+1),'LineWidth',2);
grid on;
Pk=zeros(N+tkr,Mk);
for i=1:Mk
for j=1:N+tkr
Pk(j,i)= PS(j,i);
end
end
figure(10);
x1=Lk*[0:Mk-1]/(Mk-1);
x2=R0*[0:N+tkr-1]/(N+tkr-1);

```



```

contourf(x1,x2,Pk,50);
Pf=zeros(N+tkr,Mf);
for i=Mk:Mf+Mk-1
for j=1:N+tkr
Pf(j,i-Mk+1)= PS(j,i);
end
end
figure(11);
x1=Lf*[0:Mf-1]/(Mf-1);
contourf(x1,x2,Pf,10);
figure(12)% - График давления связующего в прямой части
фильеры
xp=hf*[0:Mf];
plot(xp,PS(1,Mk:Mk+Mf),'LineWidth',2);
grid on;
%Блок определения НДС
*****
R=R*1000; % Переход в мм
t=tr*1000; % Переход в мм
Pv=Pv/10^6;
% 1)Расчет НДС для области вне фильеры
%Переход от град. Кельвина в Цельсия:
for i=1:Mv
for j=1:N
Tv(j,i)=Tv(j,i)-Coef;
end
%Tv(N,i)=25;
end
%Задание пустых матриц
Ev=zeros(N,Mv); % Задание матрицы упругости
MUv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы пуассона
uv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы перемещений
Srv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы радиальных напряжений
Stv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы окружных напряжений
Hiv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы хим. усадки
ETv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы окружной деформации
ERv=zeros(N,Mv); % Задание матрицы радиальной деформации
KTR=zeros(N,Mv); % Задание матрицы коэфф-та термич. расш.
%Цикл заполнения матриц
for i=1:Mv
for j=1:N
%Заполнение матрицы модуля упругости
%Модуль упругости связующего:
ERES=(1-(Av(j,i)^1))*Ematr/1000+Ematr*((Av(j,i)^1));
% Ematr - модуль упр. отв. связующего.

```

```

%Коэффициент Пуассона связующего:
MURES=0.5*(1-(Av(j,i)^1))+MUMatr*(Av(j,i)^1);
% MUMatr - коэфф. Пуассона отв. связующего.
%Модуль упругости композита:
Ev(j,i)=pi*ERES*RLA/(2*vf*(1-MURES^2));
%Заполнение матрицы усадочных деформаций
%Вычисление коэффициента учета содержания наполнителя:
CSC3=(1+MURES)*(1-vf)-(MUSTEKLO*vf+MURES*(1-vf))*(1-
vf)*ERES/(ESTEKLO*vf+ERES*(1-vf));
%Вычисление усадочной деформации:
HI0=(HI+1)^(1/3)-1;
HIv(j,i)=CSC3*HI0*10^(-3.08*(1-Av(j,i)));
%Заполнение матрицы коэффициента Пуассона
MUv(j,i)=vf*MUSTEKLO+(1-vf)*MURES;
%Заполнение матрицы КТР
KTR(j,i)=(KTRf+MUSTEKLO*KTRf)*vf+(KTRr+MURES*KTRr)*(1-vf)-
...
(MUSTEKLO*vf+MURES*(1-
vf))*(KTRf*ESTEKLO*vf+KTRr*ERES*(1-vf))/...
(ESTEKLO*vf+ERES*(1-vf));
end
end
lv=size(KTR); % вычисление размера матрицы
kv=lv(1);
mv=lv(2);
x2v=(R-0)*[0:kv-1]/(kv-1)+0;
x22v=[-fliplr(x2v) x2v];
x1v=Lv*[0:mv-1]/(mv-1);
ktr=[flipud(KTR);KTR];
figure(25) %
contourf(x1v,x22v,ktr);
xlabel('КЛР на выходе из фильеры')
ev=[flipud(Ev);Ev];
figure(26) %
contourf(x1v,x22v,ev);
xlabel('Модуль упругости на выходе из фильеры')
kp=[flipud(MUv);MUv];
figure(27) %
contourf(x1v,x22v,kp);
xlabel('К-т Пуассона на выходе из фильеры')
MUv(N,Mv)
% Решение дифф.ур-я для перемещений.
% Основной цикл расчета
for i=1:Mv % количество столбцов
% Задание матрицы коэффициентов СЛАУ,

```

```

% все элементы которой равны 0
a=zeros(N,N);
% Задание матрицы-строки свободных членов СЛАУ
размерностью 1 x N,
% все элементы которой равны 0
b=zeros(1,N);
for j=2:N-1 % количество строк
a(j,j)=(MUv(j,i)/(j-1)-1)*(Ev(j+1,i)/Ev(j,i)-
1)+((1+(MUv(j,i))^2)/...
(j-1)-2*MUv(j,i))*(MUv(j+1,i)-MUv(j,i))/(1-
(MUv(j,i))^2)-2-j/(j-1)^2;
a(j,j+1)=Ev(j+1,i)/Ev(j,i)+1/(j-
1)+2*MUv(j,i)*(MUv(j+1,i)-MUv(j,i))/...
(1-(MUv(j,i))^2);
a(j,j-1)=1;
b(j)=(1+MUv(j,i))*t*((KTR(j,i)*Tv(j+1,i)+HIv(j+1,i))+(Ev(j+
1,i)/Ev(j,i)-...
(1-MUv(j+1,i))/(1-MUv(j,i))-
1)*(KTR(j,i)*Tv(j,i)+HIv(j,i)))+...
(1+MUv(j,i))*t*Tv(j,i)*(KTR(j+1,i)-KTR(j,i));
% Условия симметрии (перемещение равно нулю в центре)
b(1)=0;
a(1,1)=1;
end
% Условие на поверхности
b(N)=(KTR(j,i)*Tv(N,i)+HIv(N,i))*(1+MUv(N,i));
a(N,N)=MUv(N,i)/R+1/t;
a(N,N-1)=-1/t;
x=b/a';
% Заполнение матрицы перемещений
for y=1:N
uv(y,i)=x(y);
end
clear a b x
end
lv=size(uv); % вычисление размера матрицы
kv=lv(1);
mv=lv(2);
x2v=(R-0)*[0:kv-1]/(kv-1)+0;
x22v=[-fliplr(x2v) x2v];
x1v=Lv*[0:mv-1]/(mv-1);
uuv=[flipud(uv);uv];
figure(13) % Поле перемещений в зоне за фильерой
contourf(x1v,x22v,uuv);
% Заполнение матрицы окружных напряжений

```

```

for i=1:Mv % количество столбцов
for j=2:N % количество строк
Stv(j,i)=Ev(j,i)/(1-(MUv(j,i))^2)*uv(j,i)/((j-
1)*t)+MUv(j,i)*Ev(j,i)*...
    (uv(j,i)-uv(j-1,i))/t/(1-(MUv(j,i))^2)-Ev(j,i)/(1-
MUv(j,i))*Tv(j,i)*...
    KTR(j,i)-Ev(j,i)/(1-MUv(j,i))*HIV(j,i);
end
Stv(1,i)=Stv(2,i);
end
figure(14)% Окружные напряжения в зоне за фильерой
Auroven=[-50:5:50];
ggv=[flipud(Stv);Stv];
contourf(x1v,x22v,ggv,Auroven);
xlabel('Окружные напряжения в зоне за фильерой')
% Заполнение матрицы радиальных напряжений
for i=1:Mv % количество столбцов
    for j=2:N % количество строк
        Srv(j,i)=Ev(j,i)/(1-(MUv(j,i))^2)*(uv(j,i)-uv(j-
1,i))/t+MUv(j,i)*Ev(j,i)/(1-(MUv(j,i))^2)*...
            uv(j,i)/((j-1)*t)-Ev(j,i)/(1-
MUv(j,i))*Tv(j,i)*KTR(j,i)-Ev(j,i)/(1-MUv(j,i))*HIV(j,i);
    end
Srv(1,i)=Srv(2,i);
end
figure(15)% радиальные напряжения в зоне за фильерой
gggv=[flipud(Srv);Srv];
contourf(x1v,x22v,gggv);
% Определение деформаций
% Заполнение матрицы окружных деформаций
for i=1:Mv % количество столбцов
for j=2:N % количество строк
    ETv(j,i)=uv(j,i)/t/(j-1);
end
ETv(1,i)=ETv(2,i);
end
figure(16)
etv=[flipud(ETv);ETv];
contourf(x1v,x22v,etv);
xlabel('Окружные деформации на выходе из фильеры')
% Заполнение матрицы радиальных деформаций
for i=1:Mv % количество столбцов
for j=2:N-1 % количество строк
    ERv(j,i)=(uv(j+1,i)-uv(j,i))/t;
end

```

```

ERv(1,i)=ERv(2,i);
ERv(N,i)=ERv(N-1,i);
end
figure(17)
uroven=[-0.01:0.001:0.01];
erv=[flipud(ERv);ERv];
contourf(x1v,x2v,erv,uroven);
xlabel('Радиальные деформации на выходе из фильеры')
figure(18)
HIrv=[flipud(HIv);HIv];
contourf(x1v,x2v,HIrv);
xlabel('Усадка на выходе из фильеры')
% 2)Расчет НДС для области внутри фильеры
clear u MU E Sr St ET ER a b
Ef=zeros(N,Mf); % Задание матрицы упругости
MUF=zeros(N,Mf); % Задание матрицы пуассона
u=zeros(N,Mf); % Задание матрицы перемещений
u1=zeros(N,Mf); % Задание матрицы перемещений
Sr=zeros(N,Mf); % Задание матрицы радиальных напряжений
St=zeros(N,Mf); % Задание матрицы окружных напряжений
HIf=zeros(N,Mf); % Задание матрицы хим. усадки
ET=zeros(N,Mf); % Задание матрицы окружной деформации
ER=zeros(N,Mf); % Задание матрицы радиальной деформации
KTRF=zeros(N,Mf); % Задание матрицы коэфф-та термич.
расширения
for i=1:Mf
    for j=1:N
Tf(j,i)=Tf(j,i)-Coef;
end
end
for i=1:Mf
    for j=1:N
        %Заполнение матрицы модуля упругости
        %Модуль упругости связующего:
        ERES=(1-Af(j,i))*Ematr/1000+Ematr*(Af(j,i));
        % Ematr - модуль упр. отв. связующего.
        %Коэффициент Пуассона связующего:
        MURES=0.5*(1-Af(j,i))+MUMatr*Af(j,i);
        % MUMatr - коэфф. Пуассона отв. связующего.
        %Модуль упругости композита:
        Ef(j,i)=pi*ERES*RLA/(2*vf*(1-MURES^2));
        %Заполнение матрицы усадочных деформаций
        %Вычисление коэффициента учета содержания наполнителя:
        CSC3=(1+MURES)*(1-vf)-(MUSTEKLO*vf+MURES*(1-vf))*(1-
vf)*ERES/(ESTEKLO*...

```

```

vf+ERES*(1-vf));
%Вычисление усадочной деформации:
HI0=(HI+1)^(1/3)-1;
HIif(j,i)=CSC3*HI0*10^(-3.08*(1-Af(j,i)));
%Заполнение матрицы коэффициента Пуассона
MUf(j,i)=vf*MUsteklo+(1-vf)*MURES;
%Заполнение матрицы КТР
KTRF(j,i)=(KTRf+MUsteklo*KTRf)*vf+(KTRr+MURES*KTRr)*(1-vf)-
...
(MUsteklo*vf+MURES*(1-
vf))*(KTRf*Esteklo*vf+KTRr*ERES*(1-vf))/...
(Esteklo*vf+ERES*(1-vf));
end
end
% Основной цикл расчета
for i=1:Mf % количество столбцов
    % Задание матрицы коэффициентов СЛАУ,
    % все элементы которой равны 0
    a=zeros(N,N);
    % Задание матрицы-строки свободных членов СЛАУ
    размерностью 1 x N,
    % все элементы которой равны 0
    b=zeros(1,N);
    for j=2:N-1 % количество строк
        a(j,j)=(MUf(j,i)/(j-1)-1)*(Ef(j+1,i)-
Ef(j,i))/Ef(j,i)+((1+...
(MUf(j,i))^2)/(j-1)-2*MUf(j,i))*(MUf(j+1,i)-
MUf(j,i))/...
(1-(MUf(j,i))^2)-2-j/(j-1)^2;
        a(j,j+1)=(Ef(j+1,i)-Ef(j,i))/Ef(j,i)+j/(j-
1)+2*MUf(j,i)*...
(MUf(j+1,i)-MUf(j,i))/(1-(MUf(j,i))^2);
        a(j,j-1)=1;
        b(j)=(1+MUf(j,i))*t*(KTRF(j,i)*(Tf(j+1,i)-
Tf(j,i))+HIif(j+1,i)-HIif(j,i))+...
((Ef(j+1,i)-Ef(j,i))/Ef(j,i)+(MUf(j+1,i)-
MUf(j,i))/(1-MUf(j,i)))*...
(KTRF(j,i)*Tf(j,i)+HIif(j,i)));
    end
    % Условия симметрии
    b(1)=0;
    a(1,1)=1;
    % Условие на поверхности стержня
    b(N)=-Pv*(1-
(MUf(N,i))^2)/Ef(N,i)+(KTRF(j,i)*Tf(N,i)+HIif(N,i))*...

```

```

(1+MUf(N,i));
a(N,N-1)=-1/t;
a(N,N)=MUf(N,i)/R+1/t;
x=b/a';
for y=1:N
u1(y,i)=x(y);
end
% Заполнение матрицы перемещений
if u1(N,i)>=0
% Условие на поверхности стержня
b(N)=0;
a(N,N)=1;
a(N,N-1)=0;
else
b(N)=-Pv*(1-
(MUf(N,i))^2)/Ef(N,i)+(KTRF(j,i)*Tf(N,i)+HIf(N,i))*...
(1+MUf(N,i));
a(N,N-1)=-1/t;
a(N,N)=MUf(N,i)/R+1/t;
end
x=b/a';
for y=1:N
u(y,i)=x(y);
end
clear a b x
end
l=size(u); % вычисление размера матрицы перемещений
k=l(1);
M=l(2);
x2=(R-0)*[0:k-1]/(k-1)+0;
x22=[-fliplr(x2) x2];
x1=Lf*[0:M-1]/(M-1);
uu=[flipud(u);u];
figure(20)
contourf(x1,x22,uu);
% Заполнение матрицы окружных напряжений
for i=1:Mf % количество столбцов
for j=2:N % количество строк
St(j,i)=Ef(j,i)/(1-(MUf(j,i))^2)*u(j,i)/(j-
1)/t+MUf(j,i)*Ef(j,i)*(u(j,i)-u(j-1,i))/t/...
(1-(MUf(j,i))^2)-Ef(j,i)/(1-
MUf(j,i))*Tf(j,i)*KTRF(j,i)-Ef(j,i)/(1-MUf(j,i))*HIf(j,i);
end
St(1,i)=St(2,i);
end

```

```

figure(21)
gg=[flipud(St);St];
contourf(x1,x22,gg);
xlabel('Окружные напряжения внутри фильеры')
% Заполнение матрицы радиальных напряжений
for i=1:Mf % количество столбцов
for j=2:N % количество строк
    Sr(j,i)=Ef(j,i)/(1-(MUf(j,i))^2)*(u(j,i)-u(j-
1,i))/t+MUf(j,i)*Ef(j,i)/(1-(MUf(j,i))^2)*...
    u(j,i)/((j-1)*t)-Ef(j,i)/(1-
MUf(j,i))*Tf(j,i)*KTRF(j,i)-Ef(j,i)/(1-MUf(j,i))*HIf(j,i);
end
Sr(1,i)=Sr(2,i);
end
figure(22)
ggg=[flipud(Sr);Sr];
contourf(x1,x22,ggg);
xlabel('Радиальные напряжения внутри фильеры')
% Наложение на ст.отв. окружных деформаций
ET2v=zeros(N,Mv); % Задание матрицы окружной деформации
for i=1:Mv % количество столбцов
    for j=1:N %Количество строк
        if Av(j,i)>=0.95 % Условие на поверхности стержня
            ET2v(j,i)=ETv(j,i);
        else
            ET2v(j,i)=0;
        end
    end
end
% Наложение на ст.отв. радиальных деформаций
ER2v=zeros(N,Mv); % Задание матрицы радиальной деформации
for i=1:Mv % количество столбцов
    for j=1:N %Количество строк
        if Av(j,i)>=0.95 % Условие на поверхности стержня
            ER2v(j,i)=ERv(j,i);
        else
            ER2v(j,i)=0;
        end
    end
end
figure(23)
l=size(uv); % вычисление размера матрицы перемещений
k=l(1);
M=l(2);
x2=(R-0)*[0:k-1]/(k-1)+0;

```



```

x22=[-fliplr(x2) x2];
x1=Lv*[0:M-1]/(M-1);
gg=[flipud(ER2v);ER2v];
contourf(x1,x22,gg);
figure(24)
l=size(uv); % вычисление размера матрицы перемещений
k=l(1);
M=l(2);
x2=(R-0)*[0:k-1]/(k-1)+0;
x22=[-fliplr(x2) x2];
x1=Lv*[0:M-1]/(M-1);
gg=[flipud(ET2v);ET2v];
contourf(x1,x22,gg);
% Определение усилия пултрузии
%---Определение усилия пултрузии на участке сухого трения
for i=1:Mf %Определение точки полимеризации A
    if Af(N,i)>=0.95
        n=i;
        break
    end
end
A=n;
n=0;
for i=A:Mf %Определение точки отлипания B
    if u(N,i)==0
        n=i;
        break
    end
end
if n==0
B=0;
else
B=n;
end
clear n
Nt=0;
for i=1:B % количество столбцов
    if Sr(N,i)<0
        g=2*pi()*R*hf*1000*Sr(N,i)*Ntr;% Усилие пултрузии на
шаге hf, N
        g=-g/10/1000;% Усилие пултрузии на шаге hf, тонны.
    else
        g=0;
    end
    Nt=Nt+g;
end

```

```

end
%---Определение усилия пултрузии в конусе-----
N1=0;
N2=0;
for i=m1:Mk
H=R/1000+(Lk-(i-1)*hk)*tan(ALFA);% Высота текущего сечения,
м
Vf=vf*(R/1000)^2/H^2; % значение содержания волокна на
участке
RFT=Rf*(1-0.5*((3)^0.5*pi*Vf/2)^0.5);% Толщина пленки
наполнителя, м
s=round(H/t*1000)+1;
Sbok=pi()*hk/cos(ALFA)*(hk*tan(ALFA)+2*(s-1)*t/1000); %
площадь боковой пов-ти конуса на участке в м^2
NP=sin(ALFA)*P(tkr+N-s+1,i)*Sbok/10000; %сила на участке, в
т. от сжатия пучка в конусе
N1=N1+NP; % суммарная сила на конусном участке от сжатия
пучка в конусе, в тоннах.
NVISC=U/RFT*Sbok*MUk(tkr+N-s+1,i)/10000; %сила на конусном
участке от вязкого трения в тоннах
N2=N2+NVISC;%суммарная сила на конусном участке от вязкого
усилия в тоннах
end
%---Определение усилия пултрузии в фильере-----
RFT=Rf*(1-0.5*((3)^0.5*pi*vf/2)^0.5);% Толщина пленки
наполнителя, м
Sbok=2*pi()*R/1000*hf; % площадь боковой пов-ти цилиндра в
м^2
N3=0;
for i=1:A
NVISC=U/RFT*Sbok*MUf(N,i)/10000; %сила на участке фильеры
от вязкого трения в тоннах
N3=N3+NVISC;%суммарная сила на участке от вязкого усилия в
тоннах
end
Npr=N1+N2+Nt+N3 %Суммарное усилие пултрузии.

```