

61: 03-5/1843-7

Министерство образования Российской Федерации  
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Кравченко Евгений Евгеньевич

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕШЕНИЙ КОМПОЗИТНЫХ ТРОЙНИКОВ ТРУБОПРОПРОВОДОВ

Специальность 05.07.02. – Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Научный руководитель  
д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э.Баумана  
Буланов И.М.



Москва, 2002г.

## Содержание

Введение .....	4
Глава 1. Анализ состояния вопросов. Цель и задачи исследования .....	11
1.1. Анализ конструкторско-технологических решений фасонных элементов трубопроводов топливных систем авиационной промышленности и нефтепроводов .....	11
1.2. Анализ технологических решений в производстве композитных тройников .....	22
1.3. Анализ существующих подходов к проектированию конструкции и технологии изготовления изделий из композитов .....	29
1.4. Цель и задачи исследования .....	37
Глава 2. Разработка методик для конструирования и расчета фасонных элементов трубопроводов из КМ .....	39
2.1. Модели приближенного расчета конструктивно-технологических параметров фасонных элементов трубопроводов .....	39
2.2. Использование метода конечных элементов для проектного расчета многослойных конструкций из КМ .....	42
2.3. Конструкторско-технологическое проектирование тройников, изготовленных склеиванием стеклопластиковых труб.....	68
Глава 3. Модели совмещенного конструкторско-технологического проектирования тройника из КМ. Разработка и построение морфологических блоков и баз данных .....	72
3.1. Алгоритм и этапы синтеза конструкторско-технологических решений фасонных элементов трубопроводов из ПКМ .....	72
3.2. Выбор предпочтительных вариантов с использованием функций полезности и платы за полезность .....	83
3.3. Разработка и построение морфологических блоков и баз данных конструкции фасонных элементов трубопроводов из ПКМ .....	87

3.4. Разработка и построение морфологических блоков и баз данных технологии изготовления фасонных элементов трубопроводов из ПКМ .....	100
3.5. Создание укрупненного техпроцесса .....	112
3.6. Создание конструкторско-технологической документации для синтезированных вариантов .....	115
Глава 4. Практическое применение разработанных моделей конструкторско-технологического проектирования криогенного и нефтепромыслового тройников .....	119
4.1. Анализ технического задания на разработку криогенного тройника .....	119
4.2. Совмещенное конструкторско-технологическое проектирование криогенного тройника .....	122
4.3. Выбор конструктивно-технологических параметров силовой оболочки криогенного тройника .....	128
4.4. Анализ технического задания на разработку нефтепромысловых тройников магистральных трубопроводов .....	130
4.5. Совмещенное конструкторско-технологическое проектирование нефтепромыслового тройника поддержки пластового давления .....	132
4.6. Выбор конструктивно-технологических параметров силовой оболочки нефтепромыслового тройника .....	136
Заключение и общие выводы по диссертационной работе .....	141
Список литературы .....	142

## ВВЕДЕНИЕ

Применение композиционных материалов (КМ) определяется необходимостью повышения эффективности разрабатываемых конструкций. В свою очередь КМ открывают возможности для реализации принципиально новых конструкторских решений и технологических процессов. Эффективная реализация достоинств этих материалов в конструкциях требует решения комплекса задач, связанных с конструированием изделия, выбором материалов, с определением рациональной структуры материала, соответствующей поллю механических, тепловых, химических и других воздействий, с учетом существующих технологических ограничений.

На рис. 1.1 представлена круговая диаграмма потребления полимерных композиционных материалов (ПКМ) в наиболее развитых государствах мира в различных отраслях народного хозяйства. Как следует из рис. 1.1, наибольшее применение ПКМ в настоящее время находят в нефтегазодобывающей промышленности, в авиаракетостроении и в космических программах.

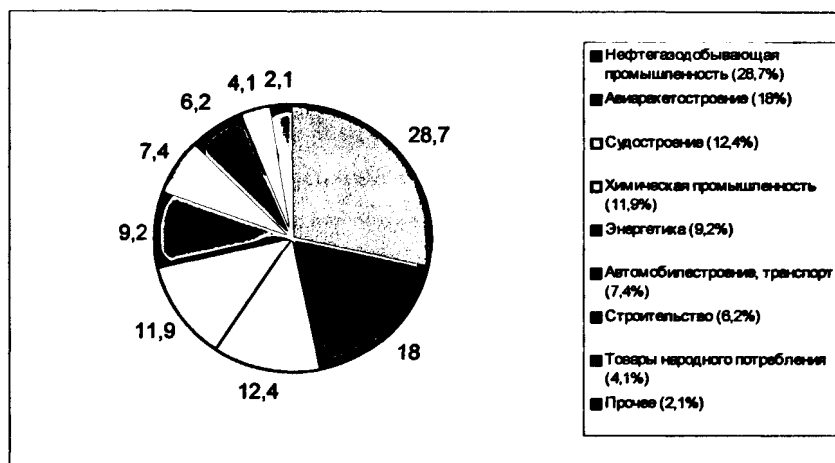


Рис. 1.1. Мировое потребление ПКМ

Для снижения массы конструкции необходимо широкое применение новых материалов (в первую очередь ПКМ) и использование методов оптимального проектирования. Композиционные материалы используются в производстве транспортных (АН-28, АН-72, "Руслан"), пассажирских (ИЛ-86, ИЛ-96-300, ИЛ-114, ТУ-204, ТУ-334), спортивных (СУ-26М, СУ-29), военных (СУ-27, С-37, изд. 70) самолетов.

Некоторые элементы конструкций космических аппаратов станций изготавливают из композитов. К ним относятся высокопрочные штанги ферм, панели солнечных батарей, сосуды давления, "сухие" отсеки, рефлекторы и т.п. Для космической станции "Альфа", созданной в соответствии с российско-американской программой, многие конструкции изготавливались из композиционных материалов.

Особое место занимают КМ в космических программах XXI века. В рамках разработки демонстратора X-34 (прототип космического челнока нового поколения) создаётся экспериментальный бак жидкого кислорода и крыло из КМ. По данным печати [1] планируется создание двух баков из КМ: первый для стендовых, второй для лётных испытаний. В ГКНПЦ им. Хруничева в план экспериментальных работ включено создание криогенного топливного бака из КМ для 1 ступени универсального разгонного модуля (УРМ) ракет системы "Ангара".

МГТУ им. Н.Э. Баумана уже несколько лет успешно сотрудничает с КБ "Салют" в области разработки и изготовления прямых и криволинейных трубопроводов из ПКМ для разгонного блока изделий 12КРБ и КВРБ ракеты-носителя "Протон". Применение трубопроводов из ПКМ также предусмотрено в новой РН "Ангара".

Применение КМ в конструкциях криогенной техники приводит к экономии массы в 1,5- 2 раза по сравнению с аналогичными металлическими конструкциями. При разработке изделий из КМ для криогенной техники очень важно, чтобы отдельные детали были созданы из материалов с одинаковыми коэффициентами линейного термического расширения (КЛТР). Иначе, в дополнение к основным нагрузкам возникают температурные.

Использование ПКМ предоставляет возможность широкого выбора исходных компонентов материала, структурных схем материалов в конструкции, технологических способов формообразования, геометрии и формы конструкции, что дает большую степень свободы разработчику.

В настоящее время во всем мире производится более 200 тысяч тонн труб

из ПКМ, в основном из стеклопластика. Углепластиковые трубы более дороги и их применение целесообразно только для снижения массы конструкции. В криогенных конструкциях трубопроводов для силовой оболочки широкое применение нашли полиимидные пленки. Наиболее известными зарубежными фирмами, которые производят композитные трубы, являются: "Пластрекс-Манурен" (Франция), "Труппо-Сарпласт" (Италия), "Хеганес" (Швеция), "Макклау-Андерсен инк", "Амерон" и "Центрон" (США). Только в США производится до 100 тысяч тонн, а в Германии и Италии - до 25 тысяч тонн труб в год.

В России и на Украине (в остальных странах СНГ подобного производства вообще нет) изготавливается не более 4 тысяч тонн стеклопластиковых труб. В России и на Украине имеются фирмы, накопившие уникальный опыт создания конструкций из ПКМ, на которых возможно производство труб и трубопроводов.

Соответственно возникла потребность производства не только трубопроводов, но также тройниковых и других фасонных элементов для трубопроводов различного назначения, в частности нефтегазовых. Силовая оболочка фасонного элемента имеет сложную форму с точки зрения намотки и в настоящее время производство фасонных элементов ограничено. Литературы, в которой рассматривается изготовление подобных элементов, также крайне мало [2].

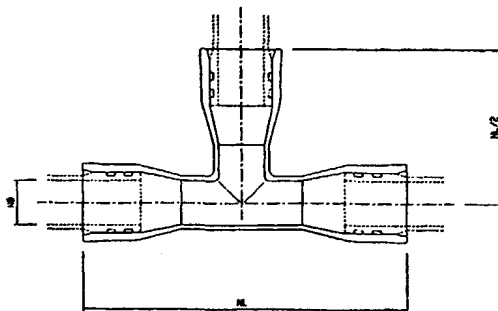


Рис.1.2. Тройник с раструбными законцовками

На рис. 1.2 показан возможный вариант конструкции тройника для трубопровода.

Создание крупномасштабного производства труб и их соединений

является перспективным направлением, и эта задача определена в приоритетных федеральных программах России.

На рис. 1.3. показан тройник из стеклопластиковой ленты после завершения намотки.

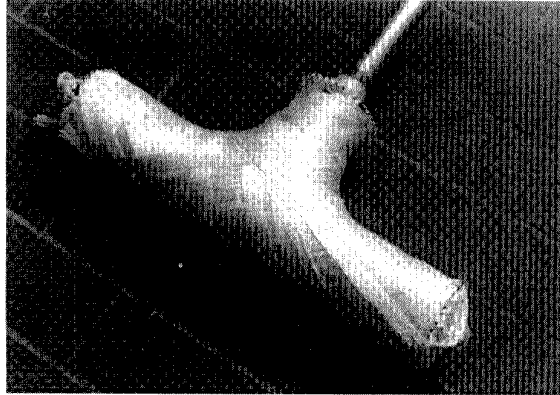


Рис.1.3. Тройник, полученный непрерывной намоткой  
стеклопластиковой лентой

Особенно это относится к трубопроводам, применяемым в аэрокосмической технике и при добыче нефти и газа, когда предъявляемые требования находятся в области экстремальных. В аэрокосмонавтике и ракетостроении это связано с началом широкого применения криогенных топлив - жидкого кислорода, жидкого водорода и сжиженного природного газа, поскольку возможности ныне используемых топлив через 25-30 лет будут исчерпаны. Поэтому в настоящее время активно разрабатывается концепция криогенного топливного комплекса ракетных и аэрокосмических систем, и прорабатываются конструкторско-технологические решения агрегатов, баков и трубопроводов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Во введении сформулирована научная проблематика, цель и методы исследования. Приводится краткое изложение содержания, а также основные положения, выносимые на защиту.

Глава I посвящена анализу конструкторско-технологических решений (КТР) фасонных элементов трубопроводов топливных систем ракетно-космической, авиационной промышленности, а также нефтепроводов,

рассмотрены принципы автоматизации проектирования конструкции и технологии изготовления изделий из ПКМ, современные методы расчета. Глава содержит обзор и анализ работ, выполненных в данной проблемной области, в результате которого сформулированы цель исследования и ряд задач, подлежащих решению.

Во второй главе изложены: модели расчета конструктивно-технологических параметров фасонных элементов трубопроводов, применение метода конечных элементов для расчета, проведено описание оболочечной конечно-элементной модели НДС тройников трубопроводов из композитов, рассмотрено проектирование тройников, изготовленных склеиванием стеклопластиковых труб.

В третьей главе изложены: алгоритм и этапы синтеза КТР фасонных элементов трубопроводов из ПКМ, задача выбора рациональных вариантов КТР с использованием функций полезности и платы за полезность, разработаны морфологические блоки и базы данных для совмещенного конструкторско-технологического проектирования фасонных элементов из ПКМ, рассмотрены технология изготовления фасонного элемента и автоматизация подготовки конструкторско-технологической документации.

В четвертой главе на основе реальных технических заданий на разработку криогенного тройника для топливопровода ЛА и нефтепромыслового тройника показано практическое использование моделей совмещенного конструкторско-технологического проектирования для выбора наилучших КТР из множества альтернативных. Для определения схемы армирования и толщины силовой оболочки тройника проведен расчет методом конечных элементов.

Все вышесказанное подтверждает актуальность, научную новизну и важность рассматриваемых в диссертации задач.

В основу данной диссертационной работы положены научно-исследовательские работы, выполненные при непосредственном участии автора в МГТУ им. Н.Э.Баумана и в КБ "Салют".

Объектом исследования является процесс разработки сложных фасонных



конструкций на примере тройников трубопроводов из КМ, а предметом исследования – модели, устанавливающие процедуру совмещенного проектирования конструкции и технологии их изготовления по некоторым критериям.

Теоретической основой диссертации является комплексный подход, основанный на единстве материалов, конструкции и технологии изготовления. Теоретические разработки выполнены на базе аппарата метода конечных элементов, теории оптимизации армированных композитов с использованием численных компьютерных экспериментов для оценки достоверности разработанных моделей.

Научная новизна состоит в совместной разработке конструкции, технологии и методов расчета тройниковых соединений трубопроводов из КМ.

Были получены следующие новые научные результаты:

- Разработана математическая модель расчета тройников из КМ, обоснован и подтвержден выбор конечного элемента для расчета композитных тройников.
- Установлены зависимости для напряжений и деформаций в тройниках от способа изготовления и углов армирования при действии внутреннего давления и осевых нагрузок.
- Разработаны основные принципы проектирования композитных тройников трубопроводов в совмещенной системе синтеза и выбора конструкторско-технологических решений, позволяющие сократить время проектирования.

Практическую ценность представляют:

- БД конструкции и технологии тройниковых элементов трубопроводов из ПКМ;
- программа автоматического разбиения тройникового элемента на конечные элементы;
- показана возможность использования существующих систем автоматизированного проектирования для автоматизации подготовки КД и создания 3<sup>x</sup> мерной модели тройника;
- разработанные в работе модели могут быть использованы в виде

дополнительных модулей для существующих систем автоматизированного проектирования.

Разработанные методики и электронные базы данных внедряются на предприятиях компании АО “Российская инновационная топливно-энергетическая компания”, что позволило повысить качество разработок и сократить время проектирования на этапе технических предложений в 3...5 раз.

Достоверность результатов исследования подтверждена сравнительными оценками выходных характеристик компьютерных КТР тройников с результатами испытаний экспериментальных образцов аналогичных тройников.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСОВ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Анализ КТР фасонных элементов трубопроводов топливных систем летательных аппаратов и нефтяных трубопроводов

Фасонные элементы из КМ могут применяться для решения задач по перекачке самого широкого диапазона рабочих сред: нефтепродуктов, различных топлив (в том числе криогенных), воды, химических реагентов, т.к. они сочетают в себе достоинства коррозионной стойкости с высокой удельной механической прочностью, которая по своим механическим характеристикам значительно превышает характеристики металлических материалов.

Основные преимущества применения ПКМ в сравнении с традиционными конструкционными материалами:

- высокие удельные прочности и модули упругости;
- высокая коррозионная стойкость внешней и внутренней поверхности, что позволяет отказаться от применения защитных покрытий, отсутствие необходимости проведения катодной защиты;
- высокая чистота внутренней поверхности, благодаря которой снижаются потери скоростного напора и которая препятствует образованию наростов;
- низкая теплопроводность ПКМ;
- низкий модуль упругости стеклопластиков позволяет упростить задачу компенсации температурных и силовых перемещений без применения компенсаторов;
- длительный срок использования трубопроводов, порядка 50-60 лет и отсутствие необходимости проведения ремонтных работ;
- удобство монтажа при применении раструбных соединений.

Для герметизирующих оболочек криогенных тройников перспективными являются морозостойкие полимерные пленочные материалы. Кроме обеспечения герметичности, оболочки из жестких полимерных пленок воспринимают часть общей нагрузки от внутреннего давления, повышая тем самым весовую эффективность конструкции в целом.

Трубы из ПКМ находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства - коммунальном хозяйстве, нефтедобывающей промышленности, угле- и газодобывающих предприятиях, химических производствах, ракетной и аэрокосмической промышленности и других отраслях.

На рис. 1.4 показан участок криогенного трубопровода для жидкого кислорода из полиимидной пленки для разрабатываемой РН “Ангара”. Фасонные элементы для подобных конструкций в настоящее время разрабатываются из металла.

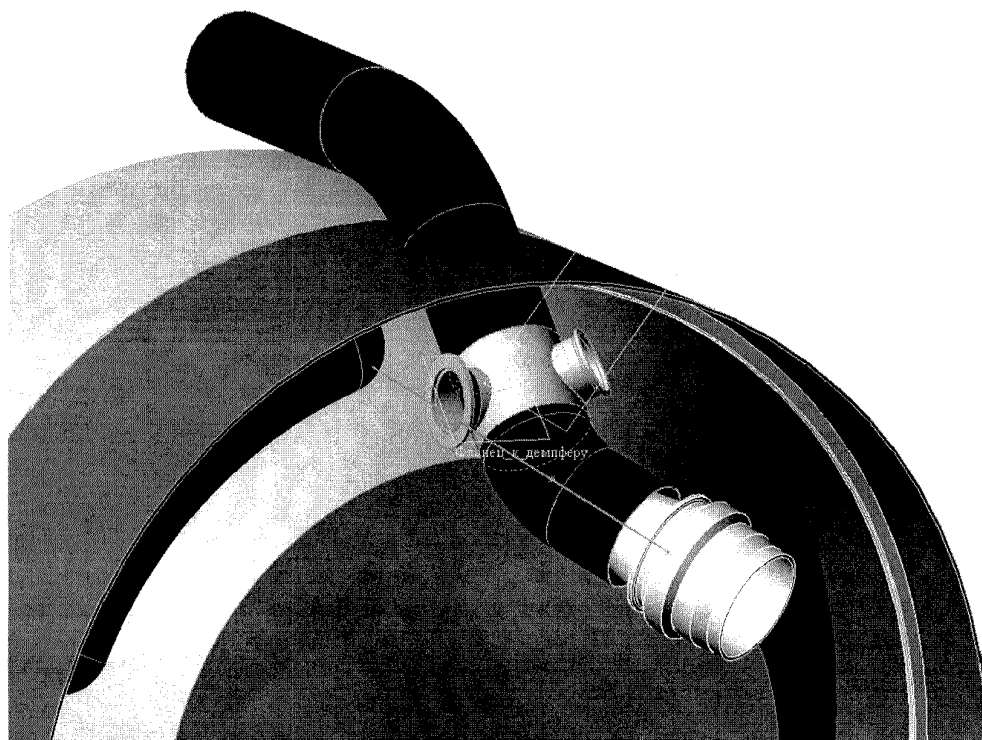


Рис.1.4. Использование фасонного элемента в трубопроводе УРМ “Ангара”

Естественно, что применение трубопроводов для различных условий работы наложило свой отпечаток как на конструкции, так и на технологии изготовления самих труб, на их соединения между собой.

Особо актуальной является задача создания отечественных нефтяных труб и фасонных элементов труб из ПКМ. Актуальность их разработки обусловлена тем, что прогрессирующее обводнение месторождений, увеличение содержания в продукции агрессивных компонентов, мероприятия по борьбе с отложениями парафинов и солей, применение различных методов интенсификации нефтеотдачи пластов (заводнение, закачка углекислого газа,

различных химических реагентов) приводит к ужесточению условий эксплуатации нефтяных трубопроводов и их соединений, росту опасности коррозии.

Конструкция тройниковых соединений трубопроводов должна обеспечивать: минимальную массу и себестоимость; расчетные характеристики, в частности, необходимые значения рабочих давлений и расходов; высокую степень герметичности, недопустимость утечек; теплоизоляцию рабочего тела во внебаковых магистралях (для авиакосмической техники); прочностные характеристики при циклических нагрузках, не допускающие разрушения; возможность очистки внутренних полостей от посторонних частиц; технически гладкую внутреннюю поверхность для условия малых гидравлических потерь; защиту внебаковых трубопроводов от статического электричества (для авиакосмической техники); негорючесть применяемых материалов; минимальные угловые и линейные перемещения, связанные с неточностью изготовления; герметичность теплоизоляции от окружающей среды; надежность при заданных условиях эксплуатации.

В литературе практически отсутствует информация по технологии изготовления фасонных элементов трубопроводов из ПКМ. Однако имеется достаточно информации об изготовлении и расчете тройниковых соединений из металлов и пластиков [3-6].

В общем случае изготовление тройника из КМ включает следующие этапы:

- 1) формообразование герметизирующей прослойки;
- 2) изготовление и установка на оправку законцовок;
- 3) намотка силовой оболочки;
- 4) формообразование теплозащитного покрытия;
- 5) создание внешнего герметизирующего слоя.

В трубопроводах различного назначения в качестве гермослоя могут применяться тонкостенные металлические оболочки, резины, термопласты, пленки и полимерные смоляные системы из нетканых и тканых материалов.

Возможность широкого выбора материалов предопределяет большое количество и разнообразие конструкторско-технологических решений герметизирующей оболочки в каждом конкретном случае, свои методики расчета конструкции на герметичность и технологических режимов их формообразования.

Выбор того или иного типа герметизирующего лайнера определяется, в первую очередь, условиями эксплуатации трубопровода и рабочей средой.

Для транспортировки топлива при нормальных температурах используются маслобензостойкие резины или термопласты. Однако, при низких температурах они охрупчиваются с образованием трещин вследствие чего происходит разгерметизация.

Поэтому при низких температурах наиболее перспективными являются плёночные материалы (полиимидные, лавсановые и полиуретановые). Лавсановые пленки химически стойки практически во всех агрессивных средах, обладают работоспособностью в диапазоне температур от 423К до 77К. Они имеют малую газонепроницаемость по кислороду [ $3 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/(с·МПа)], азоту [ $0,5 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/(с·МПа)] и другим газам. Полиимидные пленки сохраняют свою гибкость и эластичность до температуры жидкого гелия. Их прочность при температуре 573К достаточно высока и составляет 57..60Мпа, а при температуре жидкого азота (77К) она увеличивается до 300МПа. Стоимость полиимидных пленок во много раз больше лавсановых.

Наиболее рациональным способом изготовления полимерных пленочных оболочек является намотка узких лент на оправку, используя для этого технологическое оборудование и оснастку, которые применяют для намотки силового слоя.

В МГТУ имени Н.Э.Баумана проведены теоретические и экспериментальные работы по использованию пленочных материалов в конструкциях криогенных трубопроводов для разгонного блока индийского спутника (изд. 12КРБ). Также в КБ "Салют" для повышения герметичности проводились исследования по напылению алюминия ( $\approx 15$  мкм) на поверхность

пленки (металлизованные пленки).

В нефтяных трубах выбор материала герметизирующего слоя сопряжен с решением задачи защиты конструкции от агрессивных компонентов (сероводород, углекислый газ и т.п.), которые под давлением диффундируют в гермослой, а при сбросе давления разрывают материал гермослоя. Это явление получило название "кессонной" болезни.

В трубах хозяйственно-питьевого водоснабжения не применяют, как правило, герметизирующие прослойки; при рабочих давлениях герметичность обеспечивается подбором связующего и самим композиционным материалом. Однако при определенных условиях (высокое давление, активная газовая среда, агрессивные химические жидкости) трубопроводы требуют дополнительной герметизации по внутренней поверхности.

В химической промышленности в качестве внутреннего футеровочного слоя, обеспечивающего химическую стойкость и герметичность, используют термопласты типа полиамид-6, полихлорвинил, полиэтилен, полипропилен и другие материалы:

**Полиамиды (ПА)** нерастворимы в большинстве неполярных растворителей—углеводородах, сложных эфирах, хлорпроизводных углеводородов. Они растворяются только в сильно полярных растворителях (фенол, крезол, ксиленол, муравьиная и концентрированная серная кислоты, амиды и т.д.).

Полиамиды имеют стабильную температуру плавления, которая относительно мало зависит от степени полимеризации или поликонденсации. Полиамиды физиологически безвредны, содержание влаги в любых полиамидах находится в равновесии с влажностью окружающей среды, и они различаются лишь скоростью и величиной поглощения. Решающее влияние на скорость поглощения воды наряду с толщиной стенок изделия оказывает температура воды.

Изделия из полиамидов после выдерживания в воде, особенно кипящей, становятся более эластичными, а после высушивания приобретают большую твердость и жесткость, чем изделия, не подвергавшиеся действию воды, что

связано с потерей растворимых в воде низкомолекулярных продуктов.

Полиамиды устойчивы к щелочам и маслам и бензину, но недостаточно устойчивы по отношению к неорганическим и органическим кислотам;

**АБС-пластики**—это полимерные материалы на основе тройного сополимера: акрилонитрила, бутадиена и стирола. Для различных марок сополимера АБС применяют полибутадиеновый или полибутадиен-стирольный латекс. Сополимеры АБС стойки к серной и щавелевой кислотам, щелочам до концентрации 20%, глицерину, минеральным маслам, нагретым до 50 °С. Они не стойки к бензолу, толуолу, ацетону, диметилформамиду, этилацетату. АБС-пластики обладают повышенной теплостойкостью по сравнению с непластифицированным поливинилхлоридом (ПВХ) и полиэтиленом. Сополимеры легко обрабатываются и хорошо склеиваются при помощи растворителей.

К недостаткам АБС-пластиков следует отнести: пониженные по сравнению с непластифицированным ПВХ и полиолефинами атмосферостойкость и химическую стойкость; слабое сопротивление старению, определяемое полибутадиеновой (полибутадиен-стирольной) компонентой (особенно опасно комбинированное воздействие воды, кислорода и ультрафиолетового света).

В производстве труб основное применение нашел суспензионный полимер и ограниченное — эмульсионный. Смеси этих полимеров в соотношении 70 : 30 используют для изготовления специальных труб и профилей.

Вследствие сильных дипольных взаимодействий между соседними макромолекулами ПВХ обладает высокими прочностными показателями, теплостойкостью, химической стойкостью и малой растворимостью.

На практике для экструзии труб используют ПВХ с константой Фикенчера  $K = 60—70$ , а для изготовления фитингов литьем под давлением — ПВХ с  $K = 55—65$ .

**Полипропилен (ПП)** обладает по сравнению с ПЭВП повышенными теплостойкостью, жесткостью, поверхностной твердостью, длительной прочностью, стойкостью к действию химических сред при повышенных температурах, повышенной стойкостью к растрескиванию под напряжением и к



ползучести, более низкой атмосферостойкостью; при температурах ниже  $+5^{\circ}\text{C}$  хрупкость ПП нарастает.

Для производства труб используют ПП со степенью кристалличности 60—70%, молекулярной массой  $10^5$ , содержанием изотактической фракции не менее 90% и летучих (при  $200^{\circ}\text{C}$ ) не более 0,2%.

Трубы, изготовленные из ПП, содержащего сажу, применяются в наружных трубопроводах для транспортирования сред с температурой до  $60^{\circ}\text{C}$ .

**Полиэтилен.** От степени кристалличности полимера зависят такие свойства полиэтилена, как плотность, химическая стойкость и проницаемость для газов и растворителей, температуры размягчения и начала течения, поверхностная твердость и модуль упругости.

С ростом температуры степень кристалличности уменьшается, а удельный объем возрастает. Этим объясняется выраженная зависимость коэффициента объемного термического расширения от температуры. При комнатной температуре содержание кристаллической фазы составляет у полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) соответственно 40—60 и 70—90%. Каждому значению температуры соответствует определенное равновесие между кристаллической и аморфной фазами.

Под действием кислорода воздуха, температуры, ультрафиолетовых лучей происходит старение полиэтилена, выражающееся в постепенном ухудшении его физико-механических и электрических свойств, изменении химического состава и структуры. Это сопровождается потерей растворимости, эластичности и нарастанием хрупкости. Процесс старения можно замедлить введением антиоксидантов, тепловых стабилизаторов.

Основные свойства термопластов, используемых в производстве труб представлены в табл. 1. Выбор материала герметизирующего слоя связан, в первую очередь, с требованиями к герметичности и хим. стойкости. Герметизирующий слой из термопластов имеет низкую себестоимость и прост в изготовлении. В то же время необходимо учитывать отрицательные свойства пластмассовых конструкций. Например, при химическом воздействии

кислотами в условиях высоких температур происходит растрескивание конструкций.

Таблица 1

Свойства термопластов, используемых в производстве труб

Показатель	ПЭНП	ПЭВП	ПП	ПБ	ПА-6	ПА-12	Непластифицированный ПВХ	Поликарбонат	АБС-пластик
Плотность, г/см <sup>3</sup> , не менее	0,930	0,945	0,905	0,914	1,12	1,01	1,38	1,20	1,12
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	13,5	22,0	26,0	25,0	55	40	55,0	70,0	40,0
Удлинение при разрыве, %, не менее	550	700	350	300	150	230	40	50	35
Модуль упругости, МПа, не менее	200	700	1100	600	1200	1300	3000	2300	2000

Возможно применение металлокомпозитных комбинированных элементов, у которых силовая композитная оболочка используется как основной слой, обеспечивающая прочность, а тонкостенная металлическая оболочка выполняет роль герметизирующего слоя и технологической оправки в процессе намотки [7-10]. Однако в этом случае в стоимость изготовления входит и изготовление металлической трубы и изготовление композитной оболочки. Кроме того, масса металлокомпозитной конструкции выше, чем композитной с гермослоем.

Наибольшее количество исследований в области технологии композитных материалов связано с намоткой силовых оболочек из волокнистых композитов - стеклопластиков, углепластиков и органопластиков. Эта технология отработана и широко применяется для намотки различных конструкций на предприятиях НПО "Композит", ЦНИИСМ, НПО "Союз", в МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, МАТИ, НПО "Машиностроение" и в других организациях.

Большой вклад в развитие этой технологии внесли В.И. Смыслов, С.П. Половников, И.А. Соловьев, О.Г. Цыплаков, С.Л. Рогинский, В.Д. Протасов,

Е.Ф. Харченко, И.М.Буланов, М.А. Комков, В.М. Кузнецов, Г.Е. Нехороших, В.И. Дрейцер и другие [11-19].

Самым эффективным методом, позволяющим производить высокопрочные фасонные элементы трубопроводов, является метод намотки.

Тройники и крестовины наматываются на специально подготовленную оправку. Дополнительно производится подмотка или выкладка в зоне соединения основной трубы и патрубка. После полимеризации изделие снимается с оправки. При таком способе можно реализовать любой пакет материалов, любую схему армирования и разнообразные варианты фланцевых заготовок. В высоконапорных трубопроводах используется эпоксидное связующее; при уровне давлений до 1 МПа целесообразно применение более дешевого полиэфирного связующего.

Конструкторско-технологическая близость трубопроводов для ракетной и аэрокосмической техники с промышленными трубопроводами связана с возможностями рассматривать метод намотки, как метод двойных технологий, позволяющий использовать априорный опыт для создания трубопроводов хозяйственного назначения.

В авиакосмической промышленности разъемные соединения обычно выполняют фланцевыми. Соединения элементов из КМ возможно с помощью вмотанных или приклеиваемых пластиковых или металлических фланцев.

Особые требования предъявляются к соединениям элементов трубопроводов для добычи нефти. Они должны иметь прочностные характеристики, обеспечивающие их надежную эксплуатацию при воздействии внутреннего давления до 20 МПа и температуры рабочей среды до 100°C в течение 15 лет с коэффициентом запаса по прочности, равным 5, а по герметичности равным 3.

Материал трубы и узла соединения должен быть химически стойким в условиях эксплуатации к нефтепромысловым жидкостям и к реагентам, применяемым для обработки труб с целью удаления отложения парафина и солей (смесь соляной, уксусной и плавиковой кислот). В нефтяных трубопроводах, трубопроводах водоснабжения, трубопроводах, применяемых в

химической промышленности, отводы и тройники имеют, как правило, разъемное резьбовое соединение (рис.1.5).

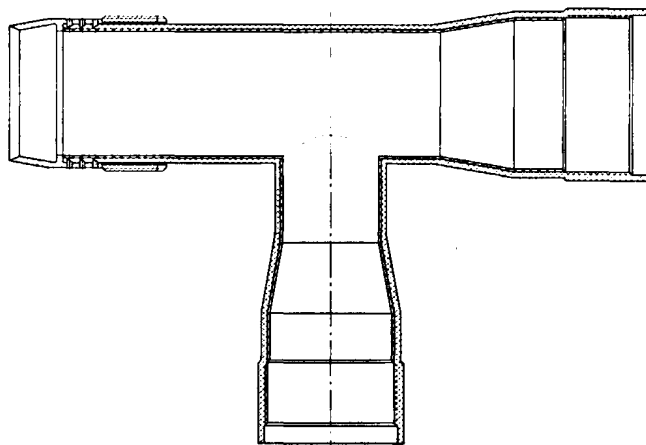
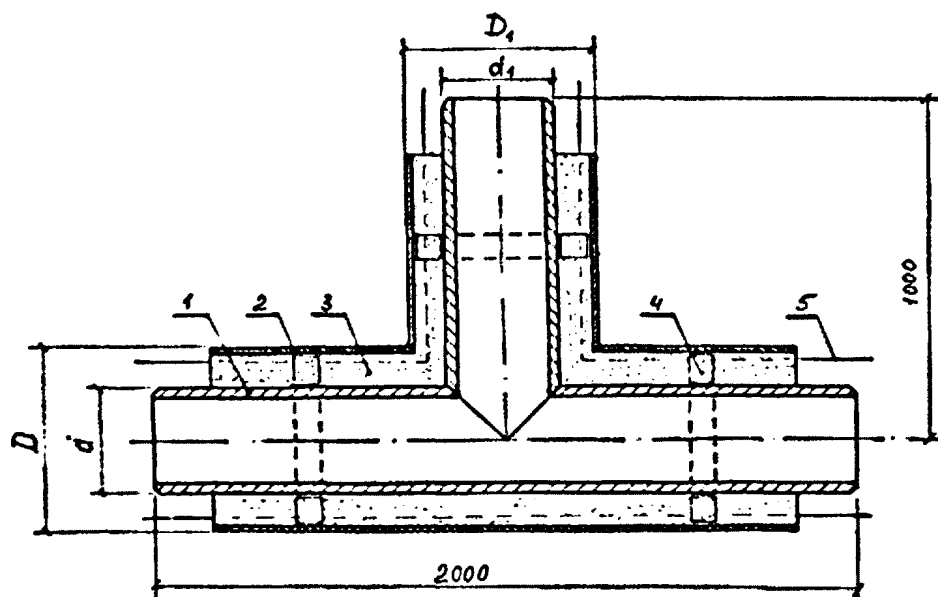


Рис. 1.5. Тройник с резьбовым соединением

Теплоизоляция криогенных трубопроводов предназначена для уменьшения теплопритока к компоненту, сохранения его температуры и кондиционного состояния при нахождении ЛА в заправленном состоянии и для обеспечения минимальных потерь компонента на испарение.



1- стальная труба; 2- оболочка из полиэтилена; 3 -изоляция из пенополиуретана; 4 -центрирующая опора; 5 - проводники-индикаторы.

Рис. 1.6. Тройник теплоизолированный

Известно несколько способов изготовления теплоизоляции. Теплоизоляционная оболочка может формироваться непосредственно на отвержденной предварительно силовой оболочке напылением с последующей

механической обработкой, либо заливкой в форму, либо склеиванием предварительно отформованных заготовок.

Основой современной теплоизоляции являются пенопласты [20-23], но так как один материал не в состоянии удовлетворить всем требованиям, на практике применяют композицию нескольких материалов, каждый из которых обеспечивает выполнение определенных требований.

Выбор того или иного способа определяется прежде всего геометрическими размерами, максимальной температурой термообработки пенопластов (не превышающей максимальную температуру отверждения силовой композитной оболочки), трудоемкостью на операции и стоимостью используемого оборудования и работ. В зависимости от этих факторов стоимость 1 м<sup>3</sup> пенопласта может различаться в 1,5-2 раза.

Таблица 2

Свойства теплоизоляционных материалов, используемых в производстве труб

Марка материала	Кажущаяся плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Диапазон рабочей температуры $T_{\min}-T_{\max}$ ; К	Коэффициент теплопроводности	
			Вт/м×К, не более	
			T=77...293К	T=293...500К
ППУ-308Н	30.. .45	77.. .423	0.018	0.032
ППУ-17Н	40.. .70	77.. .393	0.020	0.035
ППУ-И1	65.. .90	77.. .523	0.024	0.042
Изолан-8	60.. .80	77.. .523	0.018	0.027
Виласт-1ПЛ	20.. .30	93... 445	0.030	0.040
Викорт-1М	50.. .70	120.. .423	0.031	0.042

Выбор материала теплоизоляции трубопроводов и технологических способов ее изготовления не является однозначным по критериям массы, трудоемкости и себестоимости, и требует принятия решения с учетом конструкции и технологии изготовления всего трубопровода.

Таким образом, проведенный анализ элементов трубопроводов и фасонных элементов показал возможность большого числа альтернативных КТР. Так можно применить в качестве гермослоя: 1) подслоя из связующего, 2) термопласты, 3) металлы; силового слоя: 1) армированные композиты (стеклопластик, органопластик, углепластик), 2) полиимидная пленка; соединения: резьбовое, фланцевое, клеевое.

## 1.2. Анализ технологических решений в производстве композитных тройников

Для получения фасонных элементов с высокими показателями по прочности и герметичности необходимо выполнить технологические расчеты, связанные с выбором типа наполнителя, схем и режимов намотки, отверждения, способов обеспечения совместности деформирования гермослоя, силовой оболочки, теплоизоляции и др.

При проектировании силовой оболочки фасонного элемента трубопровода, безусловно, наиболее важными показателями, обеспечивающими ее массовые, механические и жесткостные характеристики являются свойства выбранного композита и схема армирования. Однако во многих исследованиях показано, что и технология изготовления вносит свой вклад в эти характеристики от 5% до 35% по разным источникам. [7]

За основной показатель, определяющий уровень технологического процесса намотки и отверждения, многими авторами принят коэффициент реализации прочности волокон или микропластика. Так в работе В.И. Смыслова [11] показано влияние вида армирующего наполнителя на коэффициент реализации прочности волокон и микропластика на основе органического волокна СВМ в производстве корпусов РДТТ с учетом технологии переработки.

В работе М.И. Корелова делается вывод, что основными факторами, определяющими коэффициент реализации прочности на операции намотки являются:

1. текстильные характеристики армирующих наполнителей (диаметр нитей, тип аппрета, число кручений нити, неоднородность);
2. технологические режимы переработки (натяжение, повреждаемость наполнителя в тракте, скорость намотки, степень армирования, контактные усилия формования).

По данным М.И. Корелова самое неблагоприятное сочетание этих факторов снизит коэффициент реализации прочности на 10...15%.

На коэффициент реализации прочности оказывают влияние тип намотки

("мокрая" или "сухая"), способы намотки. Эти исследования выполнены С.Л. Рогинским, С.П. Половниковым [12, 15].

Также технология изготовления оказывает существенное влияние на трудоемкость и себестоимость изделий. Это выражается в выборе режимов операций, типа технологической оправки для намотки, типа намоточного станка, способа отверждения материала. Например, время отверждения композита в электромагнитном поле СВЧ гораздо меньше, чем в обычных термопечах. Стоимость оборудования, потребляемая энергомощность, занимаемая площадь, в конечном счете, определяет себестоимость изделия.



Рис.1.7. Тройник, изготовленный намоткой из стеклопластика  
(МГТУ им. Н.Э.Баумана)

Силовая оболочка тройникового элемента, с точки зрения технологии намотки, имеет сложную форму. В зависимости от поставленных задач возможны различные технологические схемы изготовления силовой оболочки: намотка с использованием волокна или ленты, выкладка, склеивание из 2<sup>x</sup> прямолинейных участков.

Тройник из стеклопластика с полиимидным лейнером, представленный на рис.1.7. был изготовлен на каф. СМ-12, МГТУ им. Н.Э.Баумана. Намотка СО осуществлялась на герметизирующую оболочку из полиэтилена, выполненную склеиванием двух элементов. Этапы намотки показаны на рис. 1.8.-1.9.

Схема армирования тройника по этой технологии выбиралась путём

приближенного расчета и экспериментальной отработкой и поэтому не является оптимальной. Разрушение в зоне законцовок показывает, что конструкция имеет запас по прочности и соответственно лишнюю массу.

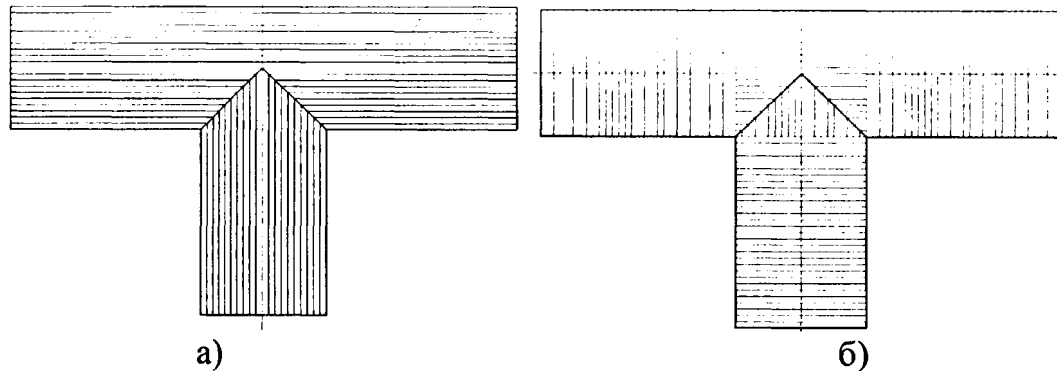


Рис.1.8. а) Укладка волокон стекловолкна под углом  $\varphi=0^\circ$  для патрубка и основной трубы б) Намотка окружного слоя на прямолинейном участке ( $\varphi=90^\circ$ )

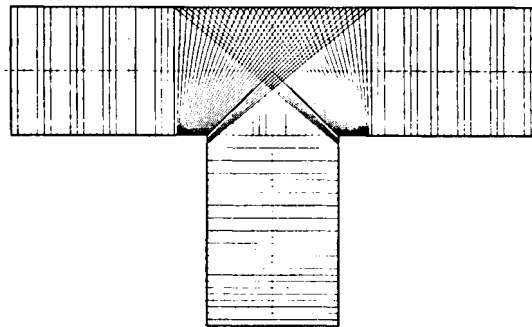


Рис.1.9. Намотка усиления в зоне соединения основной трубы и патрубка

Выполненный по этой технологии тройник прошел испытания внутренним давлением. Разрушение произошло в зоне законцовок при 12,0МПа.

Одной из наиболее простых технологий изготовления тройникового элемента является врезка и склеивание конструкции из двух прямолинейных труб.

Изготовление включает следующие этапы: намотку трубчатых заготовок, мехобработку и склеивание. Эскиз конструкции тройника приведен на рис.1.10. На рис.1.11 показан тройник на этапе склеивания.

Метод склеивания пригоден только для слабонагруженных тройников, т.к. прочность тройниковой конструкции определяется свойствами клеевого слоя. Рассмотренная конструкция позволяет изготавливать тройники из КМ для рабочих давлений не превышающих 4,0...5,0 МПа. Этот вариант композитного тройника интересен простотой изготовления.



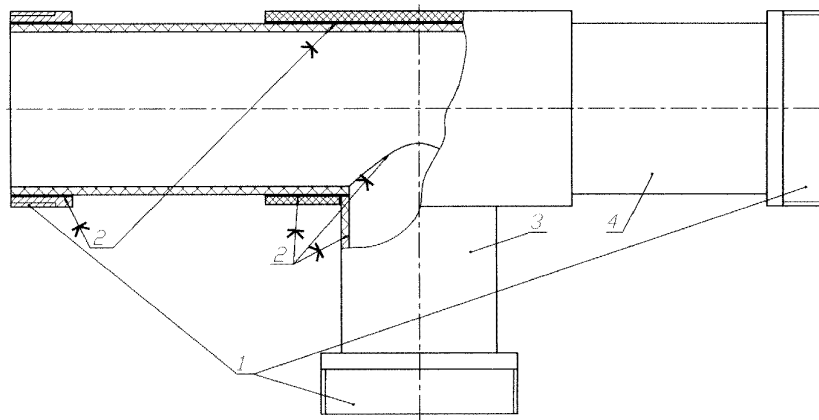


Рис.1.10. Эскиз конструкции тройника: 1-законцовки, 2- клеевое соединение, 3,4-стеклопластиковые патрубки

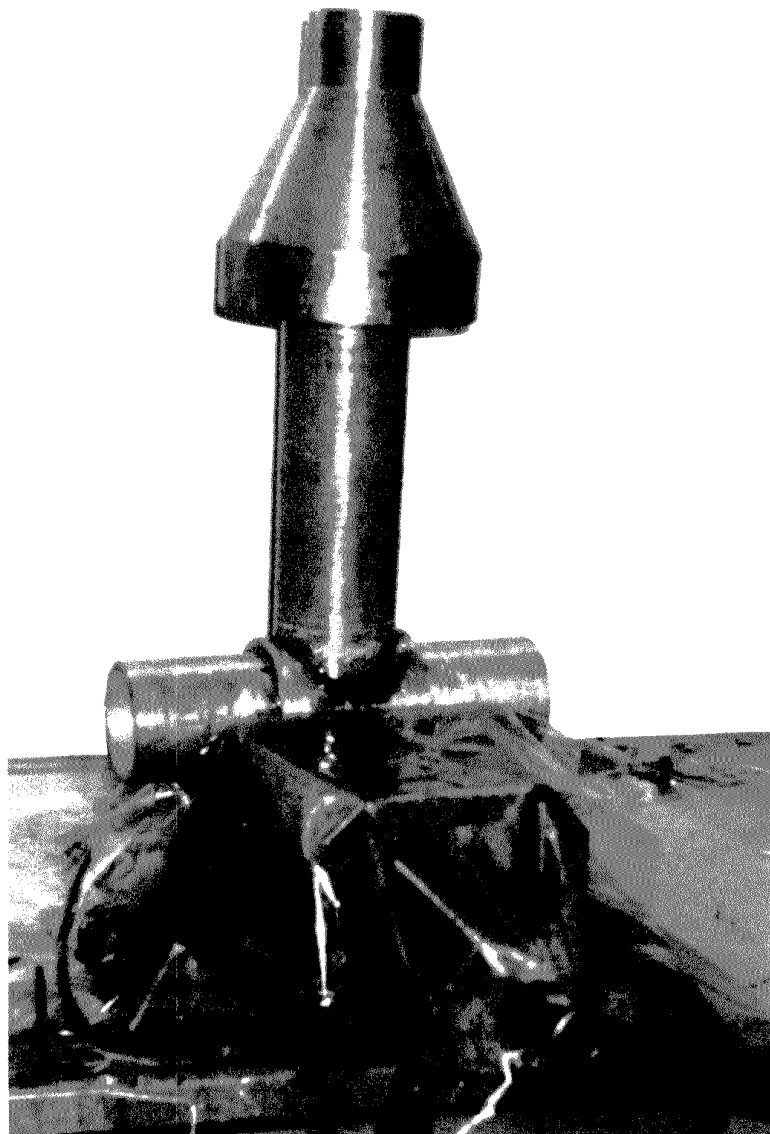


Рис.1.11. Получение силовой оболочки тройника склеиванием двух прямолинейных труб

Наиболее перспективно изготовление тройника непрерывной намоткой силового слоя. Однако в этом случае используется более дорогостоящее оборудование. На рис.1.12. представлена намотка тройника с использованием 6-координатного укладчика ленты PUMA-762 ([2], Бельгия). 3 степени свободы используются для перемещения укладчика в нужную точку и 3 для ориентации ленты относительно оправки.

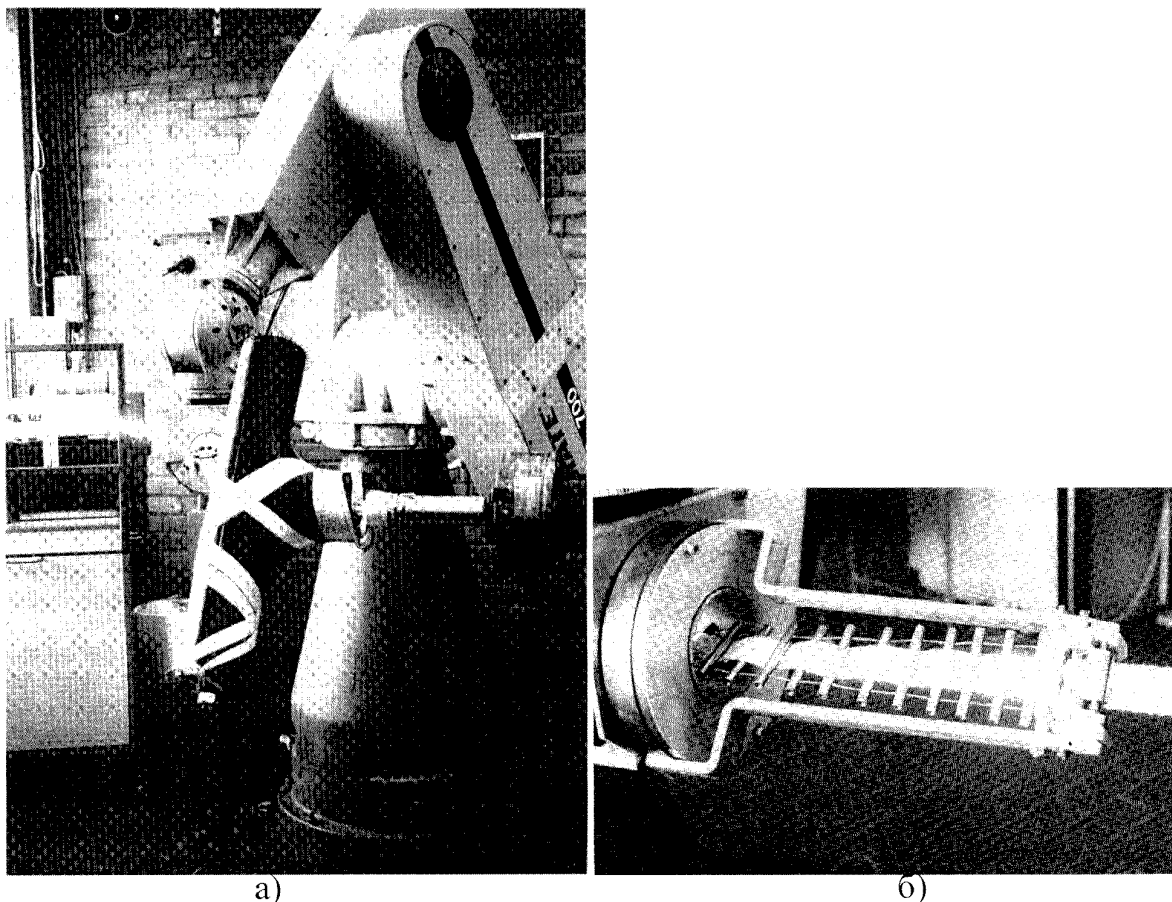


Рис.1.12. Непрерывная намотка тройника лентой с использованием укладчика PUMA-762: а) общий вид станка; б) раскладчик ленты

К сожалению, в России подобного оборудования нет. Для создания оптимальной конструкции необходимо создавать такое оборудование, а в настоящее время для изготовления тройников используются более простые технологии.

Управление намоткой и расчет траектории осуществляется с компьютера. Разбиение конструкции на зоны представлено на рис. 1.13. Для того, чтобы сделать возможной намотку в зоне пересечения патрубка и основной трубы в конструкцию включены два торовых участка (4 и 5). Таким образом, тройник состоит из 8 зон: цилиндрических (1,2,3,6), торовых (4,5) и двух плоских

поверхностей (7 и 8). Соответственно, при переходе ленты из одной зоны в другую меняется программа намотки. При этом только на цилиндрических участках используется геодезическая намотка.

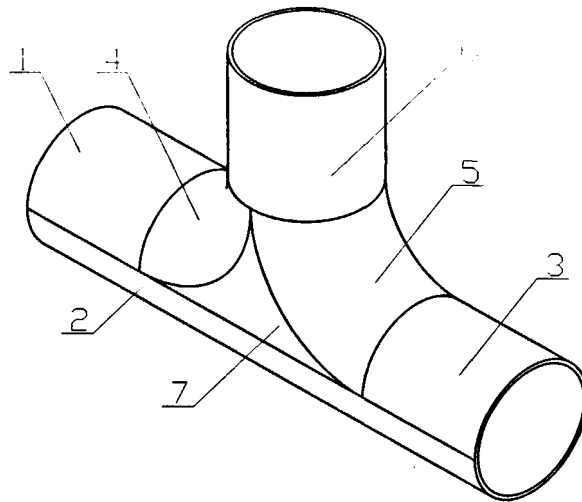


Рис.1.13. Разбиение тройника на зоны

Для намотки образца тройника был проведен анализ возможных траекторий намотки. В качестве параметров использовались начальная точка намотки  $\alpha$  (заданная с помощью угла на нижнем краю цилиндра  $\beta$ ) и угол намотки  $\varphi$  в этой точке (рис.1.14). В таблице 3 приведены возможные траектории, у которых не происходит совпадения траекторий намотки. Как видно из табл.3, только у 26% геодезических траекторий не происходит совпадения траекторий намотки волокна. Поэтому главная проблема - выбор траекторий намотки, которые полностью покрывают всю поверхность.

Таблица 3

Возможные траектории намотки

		Угол намотки																
		80	70	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80
Начальная позиция	0	1	X	X	4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	4	X	X	1
	10	X	X	4	5	X	X	X	X	X	X	X	X	5	4	X	X	1
	20	1	X	4	9	X	X	X	X	X	X	X	X	5	4	X	X	10
	30	2	X	4	X	X	X	X	X	X	X	X	6	4	X	X	2	11
	40	3	X	5	X	X	X	X	X	X	X	X	5	4	X	X	2	11
	50	X	4	6	7	X	X	X	X	X	X	X	5	X	X	X	X	11
	60	X	4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	5	X	X	X	X	11
	70	X	4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	80	X	5	7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	X
	90	X	6	8	X	X	X	X	X	X	8	X	X	X	X	2	1	X

Варианты чередования наматываемых поверхностей

код	очередность намотки поверхностей	код	очередность намотки поверхностей
1	6, 4, 7, 5, 8, 2, 7...	7	6, 4, 7, 2, 8, 2, 7 ...
2	6, 4, 7, 5, 8, 2, 3	8	6, 4, 7, 2, 1
3	6, 4, 7, 5, 3	9	6, 4, 7, 2, 8, 5, 7 ...
4	6, 4, 7, 2, 3	10	6, 4, 7, 5, 8, 2, 8, 4, 1
5	6, 4, 7, 2, 8, 5, 3	11	6, 4, 7, 5, 8, 2, 1
6	6, 4, 7, 2, 8, 5, 7 ...		

Для намотки образца в работе 2 в качестве основной была выбрана траектория типа 5 (см. таблицу 4). Траектория намотки ленты выбрана таким образом, что расстояние между двумя витками намотки равняется ширине ленты (правый край цилиндра 1 и нижний край цилиндра 6

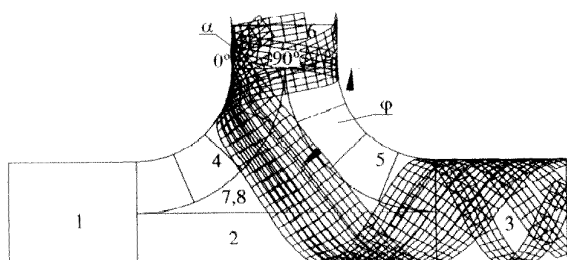


Рис.1.14. Траектории намотки ленты

Траектории не полностью параллельны: они сходятся в вершине торовой поверхности 5 и отклоняются на цилиндрах 1 и 6. Для зон тройника, которые не охвачены этими траекториями (например, вершины плоскостей 7 и 8) отобраны дополнительные траектории.

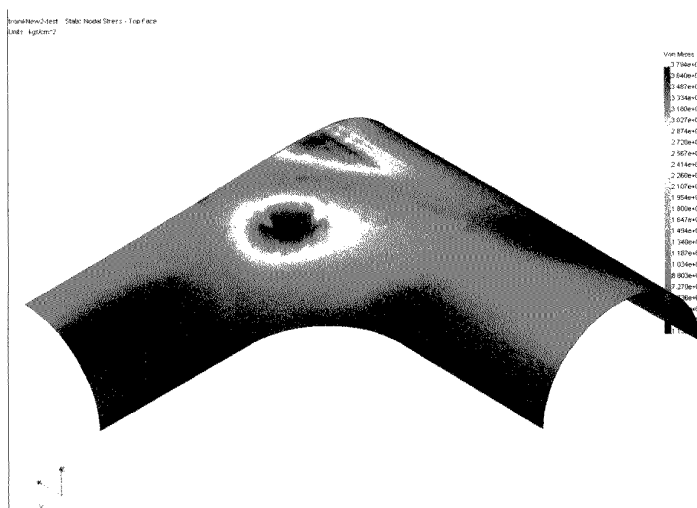


Рис. 1.15. Исследование напряженно-деформированного состояния тройника от внутреннего давления (Cosmos/Works, изотропный материал)

Для определения мест, в которых необходима повышенная толщина намотки для обеспечения равнопрочности был проведен поверочный расчет на прочность. Как видно на рис.1.15. особенность тройника с торowymi участками – дополнительный концентратор напряжений от изгиба в зоне плоских поверхностей.

### **1.3. Анализ существующих подходов к проектированию конструкции и технологии изготовления изделий из композитов**

Выполненный анализ конструкции и технологии изготовления тройников из КМ показал, что в практике проектирования всегда существует большое количество альтернативных вариантов КТР тройников.

В начале 80-х годов был сформулирован основной принцип создания изделий из ПКМ, согласно которому вопросы выбора материалов, проектирования конструкции и разработки технологического процесса должны рассматриваться как три стороны единой проблемы и не должны решаться изолированно друг от друга. Такой подход потребовал на всех этапах создания изделия более тесного взаимодействия подразделений расчетчиков, конструкторов, материаловедов и технологов.

Однако существующие организационные формы производства, наличие большого количества взаимодействующих звеньев, прямых и обратных связей приводит к различного рода задержкам передачи информации, к ее утере и искажениям, к большим затратам труда и времени на согласование работ и получаемых результатов, на выявление ошибок, и, как следствие, к медленному развитию процесса проектирования и длительным срокам разработки новых образцов.

С учетом этого особую важность приобретает задача совмещенного, увязанного проектирования конструкции и технологии изготовления изделий из ПКМ, которая базируется на методологии технологически ориентированного проектирования (С-технология) (Concurrent Engeneering).

В докторской диссертации Буланова И.М.[7] разработана методология совмещенного проектирования изделий из ПКМ на примере прямых и криволинейных

участков криогенного трубопровода. Система совмещенного конструкторско-технологического проектирования фасонных элементов как неотъемлемая часть трубопроводов является частью единой системы проектирования трубопроводов и ее следует рассматривать как развитие работы, упомянутой выше.

При использовании С-технологии проектирование включает следующие основные этапы :

1. Концептуальное проектирование, то есть синтез конструктивно-силовой схемы (КСС) изделия и принципиальной схемы технологического процесса его изготовления на основе анализа технического задания.
2. Структурное проектирование, заключающееся в синтезе вариантов конструкций в пределах заданной КСС и структуры технологического процесса.
3. Параметрическая оптимизация конструкции и технологического процесса, когда ищутся наилучшие численные значения геометрических или физических параметров (непрерывных переменных) для каждой из синтезированных конструкций и технологических процессов их изготовления.
4. Выбор предпочтительных альтернативных вариантов по принятым критериям и ограничениям.

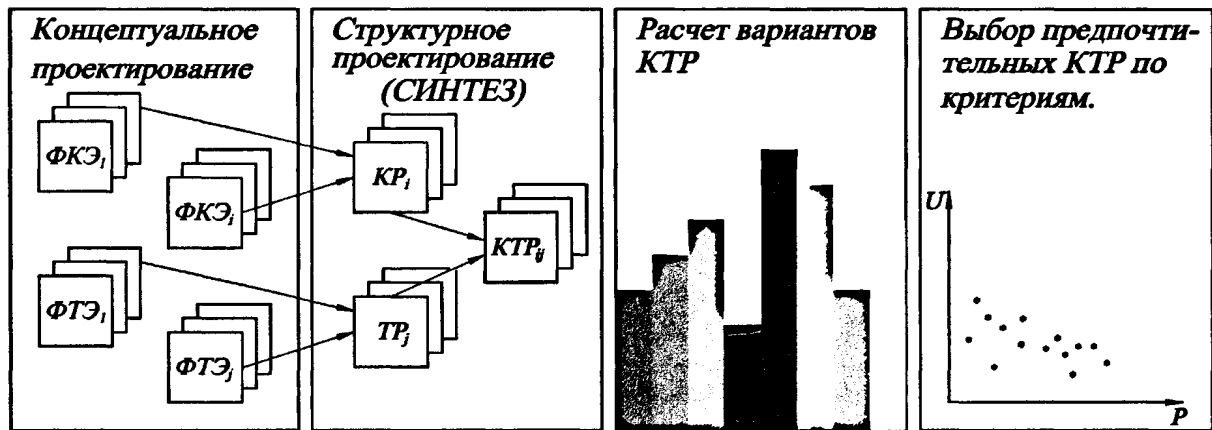


Рис. 1.16. Этапы совмещенной технологии проектирования

Процесс совмещенного проектирования осуществляется на базе формирования совместных конструкторско-технологических решений. При совмещенном конструкторско-технологическом проектировании изделий из ПКМ можно утверждать, что число синтезированных альтернативных

вариантов КТР будет значительно большим, чем при последовательном проектировании за одинаковое время. Кроме того, пользователи С-технологии имеют более четкую цель и более управляемые средства её достижения.

При оценке альтернативных КТР необходимо учитывать целый ряд частных критериев технико-экономического характера, свойственных системе “материал-конструкция-технология”. Для объективного выбора предпочтительных КТР необходима количественная оценка сравнения альтернатив. Для этого используется метод функции полезности. Каждая альтернатива в этом методе характеризуется не одним, а двумя обобщенными критериями: полезностью и платой за полезность.

Под полезностью технической системы понимается любая количественная характеристика, которая объективно служит мерой приносимой пользы при выполнении своей функциональной назначения. Масса, геометрическая точность, надежность и т.п. представляют собой разновидности полезности.

Наиболее универсальным выражением платы за полезность является стоимость технической системы, которая однако не является синонимом стоимости как экономической категории. Плата за полезность как обобщенный критерий, представляет собой функцию от ряда частных критериев, которые выделены в блоках исходных данных элементов морфоклассов конструкции и технологии и определяют ту плату, которую приходится отдавать за полезность.

Методология технологически ориентированного проектирования также разрабатывалась в работах Э.А.Сатя, Г.А. Киселева, В.А. Исаченко, А.В. Смирнова [24-28] и других отечественных и зарубежных ученых [29-32].

Совмещенная разработка изделий и процессов их изготовления в настоящее время широко развивается ведущими американскими и западноевропейскими фирмами.

В МГТУ имени Н.Э.Баумана разработана и успешно применяется система автоматизированного проектирования многослойных оболочек различной

геометрии из ПКМ, которая позволяет для заданных условий нагружения выбрать соответствующие материалы, структуру пакета, схему армирования и спроектировать оболочку минимальной массы.

Однако системы автоматизированного проектирования, существующие в настоящее время, не позволяют исследовать геометрию тройника из КМ и осуществить выбор КТР.

При разработке систем совмещенного конструкторско-технологического проектирования необходимо использовать существующие САПР-системы, т.к. в них уже существуют необходимые инструменты для ввода геометрии и возможность подключения внешних приложений. Для некоторых САПР-программ уже созданы сотни приложений. Это, например, приложения для механической обработки с автоматизированным созданием управляющих программ для станков с ЧПУ (PowerMill, Teksoft CamWorks), программы расчета заливки (3D QuickFill, Moldflow), расчетные приложения (DesignSpace, Cosmos/Works, Working Model 4d). Выбор базовой САПР-программы осуществляется в масштабах всего предприятия, для обеспечения совместимости форматов данных между различными подразделениями.

В работах Прокофьева Г.И. [33-35] представлена классификация технологий формообразования композитных конструкций. Идентификация поверхностей осуществляется с применением генераторов параметров, реализованных в модулях CAD/CAM/CAE систем (EUCLID, DUCT, UNIGRAPHIX).

Российская фирма "Топ Системы" разработала систему автоматизированного проектирования T-FLEX CAD.

Задачи этой системы:

1. Управление проектами и техническим документооборотом.
2. Создание трехмерной модели изделия.
3. Создание конструкторской документации на изделие (чертежи, спецификации и т.д.).
4. Создание технологической документации на изделие.



5. Всесторонний анализ изделия (расчеты на прочность, динамический анализ и т.д.).
6. Создание технологической оснастки для изготовления изделия.
7. Изготовление изделия (подготовка программ для станков с ЧПУ).

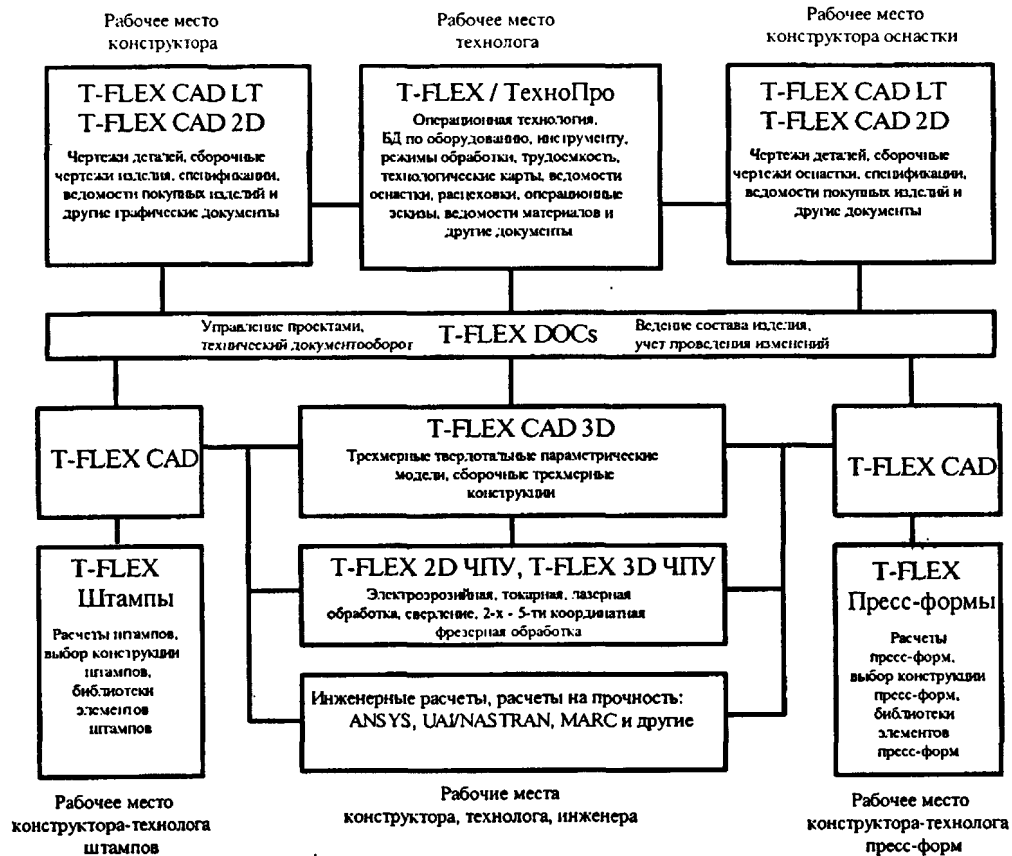


Рис.1.17. Структура комплекса автоматизации проектирования на базе программных продуктов T-FLEX

Как видно из рис. 1.17. подобные системы позволяют учитывать новые технологии и методы проектирования за счет дополнительно встраиваемых модулей.

Особое место в проектировании трубопроводов и фасонных элементов занимают соединения. В работе [36] представлена классификация соединения типа “Раструб”.

В этой работе предложен системный подход к исследованию трубопроводных соединений. Соединение подразделяется на ряд подсистем. Взаимодействие подсистем между собой и с внешней средой, рабочей и (или) окружающей средой осуществляется в основном элементами системы низшего ранга – рабочими поверхностями уплотнений, пар трения и др.

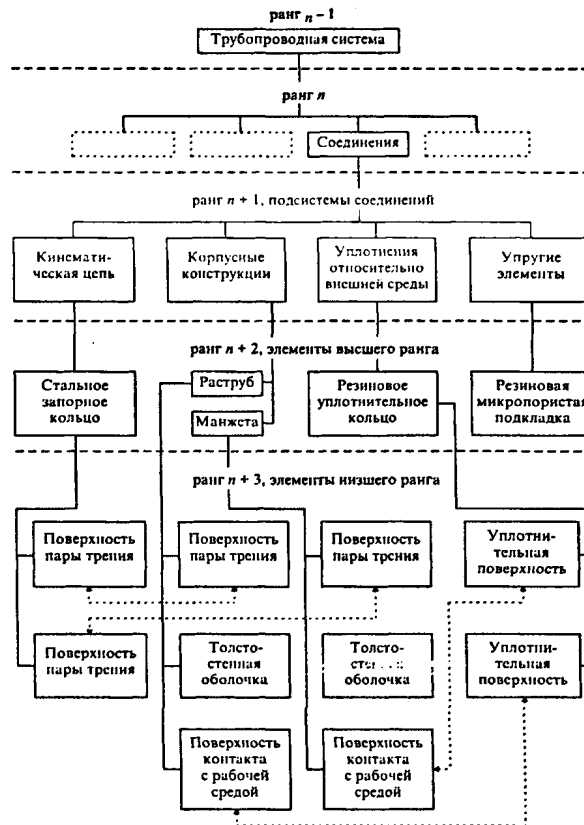


Рис. 1.18. Структура соединения типа "Раструб"

Качество и количество новых разработок напрямую увязываются со степенью освоения и оснащённостью предприятия программами CAD/CAM/CAE/PDM. Первым и логически понятным шагом в этом направлении является оснащение конструкторских подразделений CAD системами. Основная часть проекта выполняется традиционными "бумажными" технологиями. В стороне от автоматизации остаются инженеры-технологи, инструментальщики, программисты ЧПУ, проектировщики оснастки. При таком подходе ожидаемого улучшения работы всего предприятия, как правило, не наступает, да и не может наступить, так как не реализованы глобальные идеи сквозного проектирования. Совмещенное конструкторско-технологическое проектирование значительно ускоряет процесс проектирования при одновременном улучшении качества продукции.

Большинство известных систем автоматизированного проектирования предназначено в основном для проектирования конструкции и не учитывают при этом альтернативные технологии их получения, которые могут значительно повлиять на конструкторское решение. Кроме того, на ранних стадиях

проектирования приходится сталкиваться с большим числом неопределенностей технического и экономического характера, связанных как с оценкой самой конструкции, так и с технологией ее создания.

Современные САД-системы позволяют создать параметризованную твердотельную модель почти любой конструкции. В САПР-системах Catia, SolidWorks, Unigraphics предусмотрены специальные модули для работы с трубопроводами. Эти модули позволяют:

- модернизировать библиотеку стандартных элементов (тройников, отводов, труб стандартного диаметра) под нужды конкретного предприятия,
- задать маршрут прокладки любой кривизны, а далее, используя библиотеку стандартных элементов и точки соединения, автоматически создается модель сборки.
- провести дополнительные расчеты (в частности методом конечных элементов).

Применение этих систем опробовано на различных предприятиях для проектирования и расчета изотропных конструкций. В случае использования этих систем для изделий из ПКМ необходимо провести дополнительные работы. Во-первых, стандартные элементы должны являться не деталями, а сборочными единицами. Кроме того, при расчетах в универсальных программах не учитывается анизотропия конструкции.

Впервые решение задачи определения напряжённого состояния соединения “тройник” для изотропного материала методом конечных элементов проведено в Калифорнийском университете Л.Геррманном и Д.Кемпбеллом в 1968г. Оболочки заменялись совокупностью плоских четырёхугольных элементов, каждый из которых обладал 16 степенями свободы. В работе Куликова Ю.А. [37] для расчета использовались прямоугольные конечные элементы Кантина-Клафа обладающие радиусами кривизны. При применении искривленных конечных элементов (КЭ) достаточно меньшей размерности системы.

В дальнейшем были разработаны конечные элементы для многослойных

оболочек из КМ. Такие элементы существуют в универсальных программах, разработанных в 90-х гг., например в MSC/Nastran, Patran, I-DEAS. В этих программах используют плоские конечные элементы (трёх- и четырехугольные) с линейной или параболической аппроксимацией деформаций. В отечественной литературе [38,39] также описаны конечные элементы обладающие кривизной.

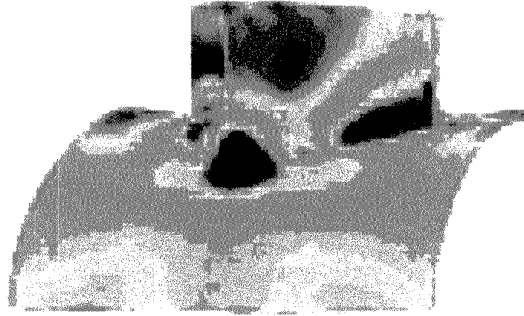


Рис. 1.19. Эквивалентные напряжения в тройниковом соединении

Для изотропных конструкций подобный метод использован в [40]. С помощью системы Ansys были получены напряжения в сварных швах тройниковых соединений для газопроводов (рис. 1.19). Таким образом, существует возможность расчета различных конструкций из КМ, используя стандартные расчетные пакеты. Для этого необходимо создать конечно-элементную модель с заданием направления армирования для слоёв материала. Также расчетам элементов трубопроводов посвящены работы Левакова С.В. и Роганова А.С. [41,42].

Для расчетов тройников из изотропных материалов возможен расчет с использованием объемных конечных элементов. Это позволяет использовать  $3^x$ -мерную модель, созданную в любой из систем САПР и автоматическую генерацию сетки. Для аэрокосмической техники  $3^x$ -мерная модель создается в любом случае из-за сложной компоновки и необходимости увязывать расположение различных элементов системы. У композитных тройников автоматическое формирование сетки объемных элементов сложнее из-за необходимости задавать переменную по координатам схему армирования.

Для случая использования КЭ сетки из объемных элементов можно проводить расчет с учетом законцовок. Контактные усилия, возникающие в

законцовках (муфтовые, фланцевые, клеевые соединения) можно описать элементами контакта (GAP), существующими в программах MSC/Nastran, Ansys, I-DEAS и др.

В данной работе для расчетов МКЭ используется КЭ многослойной панели (Laminate). В качестве условий нагружения используется внутреннее давление, усилие от законцовок передаются осевой силой, крутящими и изгибающими моментами. Законцовки и резьбовые соединения, используемые в нефтяных трубопроводах, рассчитываются отдельно. При этом расчет может быть не только поверочным, но и проектным за счет малого времени счета и возможности перебора большого количества вариантов с различными схемами армирования и корректировкой толщины.

#### **1.4. Цель и задачи исследования**

Проблема разработки тройниковых конструкций из КМ для трубопроводов связана с решением ряда специфических задач, таких как выбор материалов силовой и герметизирующей оболочки, схемы намотки силового слоя, конструкции законцовок. Представленная работа позволяет продвинуться вперед в вопросах связанных с конкурентоспособностью изделия.

Полученные результаты помогут разработчикам оборудования создавать специализированные намоточные станки для изготовления тройников.

Поэтому целью диссертационной работы является создание методики проектирования, позволяющей сократить сроки разработки, повысить качество и эффективность конструкторско-технологических решений композитных тройников трубопроводов.

Поставленная цель предопределяет необходимость решения в совокупности следующих основных задач:

1. Анализ современного состояния вопросов проектирования и изготовления тройников трубопроводов из КМ.
2. Разработка методики применения метода конечных элементов для проектного расчета композитных тройников трубопроводов.
3. Разработка баз данных элементов конструкции и технологии изготовления

композитных тройников трубопроводов.

4. Проверка соответствия результатов теоретических расчетов напряженно-деформированного состояния тройников с результатами экспериментальных исследований. Оценка достоверности методик.
5. Разработка конструкторско-технологических рекомендаций в производство композитных тройников трубопроводов и проектирование технологического оборудования для их изготовления.

Совместное решение этих задач позволяет разработчикам в рамках сформулированного технического задания (ТЗ) на базе разработанной модели и программного обеспечения в кратчайшие сроки осуществить направленный синтез большого числа КТР, определить их конструкторские и технологические параметры, выстроить полученный ряд КТР в порядке приоритета и выбрать наилучшее из них в условиях индивидуального предприятия для внедрения в производство.

#### **Выводы по главе 1:**

1. Из проведенного анализа КТР тройников трубопроводов из КМ следует, что существует большое количество вариантов возможных альтернативных конструкций, технологий изготовления тройников. Разнообразие КТР и необходимость выбора оптимальных КТР обуславливает необходимость применения методов совмещенного конструкторско-технологического проектирования.
2. Анализ технологических решений в производстве тройников из КМ показал, что наиболее перспективным является изготовление тройника непрерывной намоткой силового слоя.
3. Наиболее точно оценить НДС тройника позволяет метод конечных элементов. В литературе для расчетов тройников методом конечных элементов использовались только изотропные материалы, результаты исследований с учетом структуры многослойных фасонных элементов из волокнистых композитов в литературе практически отсутствуют.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРОЙНИКОВ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ КМ

### 2.1. Модели расчета конструктивных параметров фасонных элементов трубопроводов

В настоящей работе разработаны модели проектирования тройников из композитов на базе метода конечных элементов на примере тройников для криогенной топливной системы разгонного блока ракеты-носителя и нефтяных трубопроводов.

На рис.2.1 представлена общая конструктивно-силовая схема этих конструкций. В общем случае конструкция такого тройника состоит из герметизирующего лайнера, силовой композитной оболочки, теплоизоляционной оболочки и законцовок.

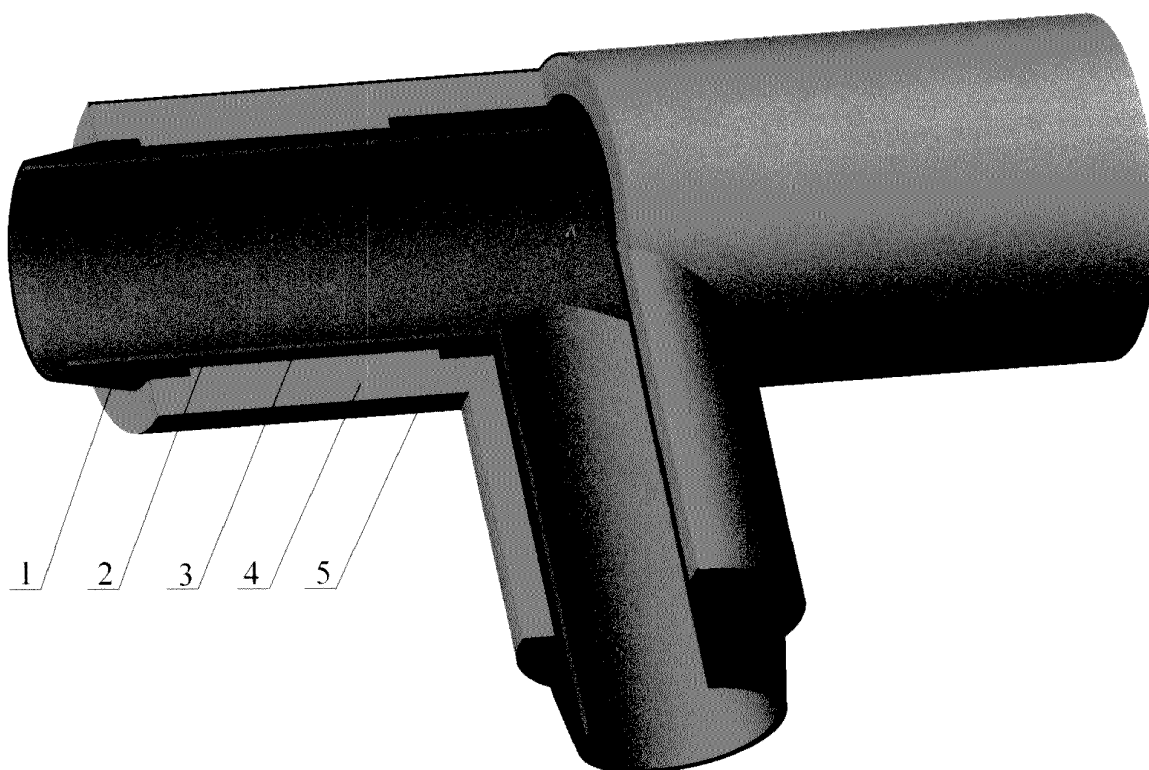


Рис. 2.1. Конструктивно силовая схема тройника:

1 - герметизирующая оболочка; 2 - законцовка; 3 - силовая оболочка; 4 - теплоизоляционная оболочка; 5 -наружная защитная оболочка

В разработанных моделях приняты следующие допущения:

1. В качестве основного вида нагружения рассматривается только внутреннее

давление и осевая сила; изгибающие и крутящие моменты не учитываются.

- Расчет напряженно-деформированного состояния тройника выполнен для силовой и герметизирующей оболочки без учета теплоизоляционной оболочки и законцовок.

По известным уравнениям механики композитов можно приближенно оценить толщину цилиндрической части тройника.

Основной вид нагружения для фасонных элементов трубопроводов – внутреннее давление.

Для цилиндрических участков толщина определяется по формуле:

$$h \geq f_{\text{без}} \cdot \frac{P_{\text{раб}} \cdot R_y}{[\sigma_{\text{раст.окр}}]}, \quad (2.1)$$

где  $P_{\text{раб}}$  - рабочее внутреннее давление,  $[\sigma_{\text{раст.окр}}]$  - допустимые напряжения в материале,  $f_{\text{без}}$  - коэффициент безопасности.

$$f_{\text{без}} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3,$$

где  $f_1 \approx 1,25$  - коэфф. безопасности, учитывающий погрешности расчетных схем, нагрузок, формул.,

$f_2$  - коэффициент, учитывающий неоднородность материала,

$f_3$  - коэффициент запаса.

В зоне соединения оболочек напряжения значительно выше. Для оценки возмущения напряженного состояния в зоне пересечения труб используют коэффициенты концентрации напряжений:

1)  $K_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}}{\sigma_{\text{ЭКВ}}}$ , где  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  - наибольшего эквивалентного напряжения,  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  - соответствующее номинальное напряжение.

2)  $K_1 = \frac{\sigma_1^{\text{max}}}{\sigma_1}$ , где  $\sigma_1^{\text{max}}$  - максимальное значение главного напряжения,  $\sigma_1$  - номинальное напряжение безмоментного состояния.

3)  $K_\xi = \frac{\sigma_\xi^{\text{max}}}{\sigma_\xi}$ , где  $\sigma_\xi^{\text{max}}$  - максимальное осевое напряжение,  $\sigma_\xi$  - номинальное значение осевого напряжения.

В таблице 5 [37] приведены значения коэффициентов концентрации напряжения для изотропного материала в зависимости от отношения  $R/H$  ( $r/h$ ), где  $R$ ,  $H$  – радиус и толщина силового слоя основной трубы,  $R$ ,  $h$  – радиус



и толщина силового слоя патрубка.

Табл.5

Значения коэффициента концентрации напряжений в зависимости от R/H

Коэффициент концентрации	Отношение $\frac{R}{H} = \frac{r}{h}$		
	25	50	100
$K_{эв} = \frac{\sigma_{эв.}^{\max}}{\sigma_{эв.}}$	6.58	7.78	8.84
$K_1 = \frac{\sigma_1^{\max}}{\sigma_1}$	5.67	6.94	8.4
$K_\xi = \frac{\sigma_\xi^{\max}}{\sigma_\xi}$	11.2	12.6	12.5

Изменения коэффициентов концентрации напряжений в зависимости от относительных размеров тройника представлены на рис. 2.2.

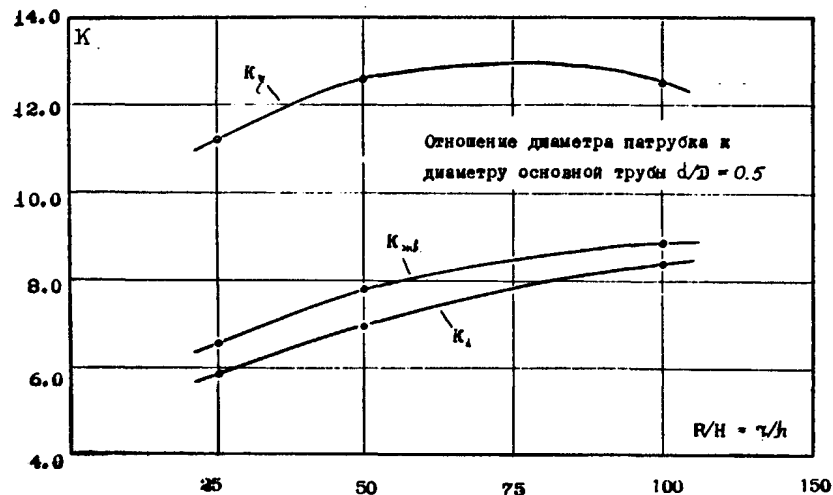


Рис. 2.2. Графики изменения коэффициентов концентрации в зависимости от отношения R/H (r/h).

Таким образом  $h \geq K \cdot f_{\text{без}} \cdot \frac{P_{\text{раб}} \cdot R_y}{[\sigma_{\text{раст.окр.}}]}$  (2.2)

Пересчет напряжений для слоев, образованных спиральной намоткой в систему координат слоя:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}, \quad (2.3)$$

где  $\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$  - напряжения в слое,  $c = \cos(\varphi)$ ,  $s = \sin(\varphi)$ .

Метод конечных элементов позволяет более точно оценить НДС тройника по сравнению с приближенными методами. При этом кроме внутреннего давления можно учитывать температурные нагрузки и моменты на фланцах, возникающие от температурных деформаций и неточности монтажа.

## 2.2. Использование метода конечных элементов для проектного расчета многослойных конструкций из КМ

**Конечные элементы для круговой цилиндрической оболочки.** На первом этапе решения задачи методом конечных элементов требуется разделить конструкцию на отдельные конечные элементы (КЭ). Для расчета оболочек разработано и исследовано большое число разнообразных конечных элементов [37-39,43-51]. Для расчёта конструкций тонкостенных оболочек используются как плоские, так и искривленные элементы. Достоинством плоских КЭ является универсальность, т.к. они могут быть использованы для оболочек любой геометрии, но с другой стороны их применение для решения задачи с "хорошей" точностью требует достаточно мелкой сетки. Следствием этого является более высокий порядок системы разрешающих уравнений. Однако к настоящему времени обычные персональные компьютеры (PC) имеют достаточное быстродействие и объем памяти для решения трудоемких разрешающих уравнений. Кроме того, плоские КЭ используют в доступных конечно-элементных программах (MSC/Nastran). Подобные программы оптимизированы под архитектуру компьютера и на практике не проигрывают в быстродействии самостоятельно разработанным на языках высокого уровня (Fortran, C++) программам. Искривленные элементы требуют самостоятельной разработки для каждого геометрического класса оболочек.

Формулировка принципа возможных перемещений для плоских конечных элементов может быть представлена следующим образом:

$$\iint_S \delta \varepsilon^T D \varepsilon dS = \iint_S \delta u^T p dS + \int_{\Gamma} \delta u^T \bar{N} d\Gamma, \quad (2.4)$$

где:

$a = \iint_S \delta \varepsilon^T D \varepsilon dS$  - работа внутренних сил на деформациях  $\delta \varepsilon$ , вызываемых

возможными перемещениями  $\delta u$ ;

$$\iint_S \delta u^T p dS + \int_\Gamma \delta u^T \bar{N} d\Gamma - \text{ работа внешних сил.}$$

Соотношения между деформациями  $\epsilon = [\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}, \kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}]^T$ , где

$\epsilon = [\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}]^T$  - деформации в средней плоскости,

$\kappa = [\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}]^T$  - кривизны и крутка,

$\gamma = [\gamma_{xz}, \gamma_{yz}]^T$  - углы сдвига поперечных сечений пластины

и перемещениями имеют вид:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \epsilon_y &= \frac{\partial u}{\partial y}; & \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \\ \kappa_x &= \frac{\partial \theta_x}{\partial x}; & \kappa_y &= \frac{\partial \theta_y}{\partial y}; & \kappa_{xy} &= \frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x}; \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \theta_x; & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \theta_y. \end{aligned} \quad (2.6)$$

В тензорном виде  $\epsilon = Lu$ , (2.7)

где

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \partial/\partial y \\ 0 & 0 & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \\ 0 & \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 & 0 \\ \partial/\partial x & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \partial/\partial y & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$$u = [w, \theta_x, \theta_y, u_x, u_y]^T. \quad (2.9)$$

Внутренние силовые факторы  $N = [N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y]$  связаны с обобщенными деформациями  $\epsilon$  соотношением:  $N = D \epsilon$ . (2.10)

Матрица приведенных жесткостных характеристик  $D$  при использовании анизотропного материала имеет вид:

$$D = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} & C_{11} & C_{12} & C_{16} & 0 & 0 \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & C_{12} & C_{22} & C_{26} & 0 & 0 \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & C_{16} & C_{26} & C_{66} & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{12} & C_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} & 0 & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{11} & K_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

где:

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) - \text{мембранная жесткость,} \quad (2.12)$$

$$C_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) - \text{смешанная жесткость,} \quad (2.13)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) - \text{изгибная жесткость,} \quad (2.14)$$

$K_{ij}$  – жесткость при поперечном сдвиге.

Для расчета матрицы  $D$  необходимо для каждого слоя задавать материал, угол армирования и толщину. У ортотропного материала используется 4 независимых константы:  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$  (или  $\nu_{21}$ ),  $G_{12}$ . Кроме того, для учета поперечного сдвига задаются  $G_{13}$  и  $G_{23}$ .

При формировании матрицы приведенных жесткостных характеристик КЭ производится преобразование характеристик монослоя к системе координат КЭ  $[X_m, Y_m]$ , полученной вращением осей (1,2) вокруг оси 3 на угол  $\theta$  (рис.2.3.).

Матрица жёсткости слоя преобразуется следующим образом:

$$[\bar{Q}] = [U]^T \cdot [Q] \cdot [U], \quad (2.15)$$

где  $\bar{Q}$  - матрица жесткости в системе координат элемента.

$[U]$  - матрица преобразования.

$$[U] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & sc \\ s^2 & c^2 & -sc \\ -2sc & 2sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

где  $s = \sin \theta$ ,  $c = \cos \theta$ .

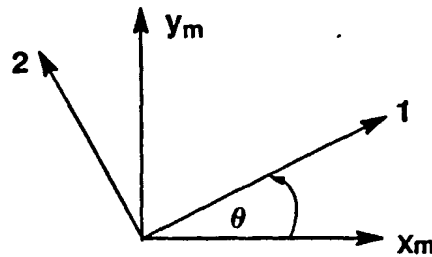


Рис.2.3 Системы координат монослоя (1,2) и КЭ ( $x_m, y_m$ )

Для симметричного многослойного пакета (см. пример 4), составленного из различных слоев ортотропных материалов при схеме армирования,

определяемой технологией изготовления, матрица жесткостных характеристик принимает вид:

$$D = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{11}^{[i]} t_1^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{12}^{[i]} t_1^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{16}^{[i]} t_1^{[i]} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{12}^{[i]} t_1^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{22}^{[i]} t_1^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{26}^{[i]} t_1^{[i]} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{16}^{[i]} t_1^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{16}^{[i]} t_1^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{66}^{[i]} t_1^{[i]} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{11}^{[i]} t_3^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{12}^{[i]} t_3^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{16}^{[i]} t_3^{[i]} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{12}^{[i]} t_3^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{22}^{[i]} t_3^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{26}^{[i]} t_3^{[i]} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{16}^{[i]} t_3^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{26}^{[i]} t_3^{[i]} & \sum_{i=1}^k \bar{Q}_{66}^{[i]} t_3^{[i]} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{22} \end{bmatrix},$$

где  $t_1^{[i]} = z_i - z_{i-1}$ ;  $t_3^{[i]} = (z_{(i)}^3 - z_{(i-1)}^3) / 3$ .

В этом случае возможно использование конечных элементов, не учитывающих смешанные жесткости (например, CQUADR из пакета MSC/Nastran).

При использовании усиления в зоне пересечения труб (см. пример 5), пакет слоев из ортотропного материала смещен относительно средней плоскости и в этом случае матрица жесткостных характеристик может иметь полностью заполненный вид (см. формулу 2.11). При этом необходимо использование КЭ учитывающих смешанные жесткости  $C_{ij}$ .

Метод конечных элементов предполагает аппроксимацию перемещений в пределах элемента:  $u = \Phi q$ , (2.17)

где  $\Phi$  – матрица функций форм аппроксимаций;  $q$  – вектор столбец обобщенных перемещений. Аналогичным образом аппроксимируют возможные перемещения  $\delta u = \Phi \delta q$ , (2.18)

где  $\delta q$  – вектор-столбец произвольных коэффициентов.

Воспользовавшись соотношением между деформациями и перемещениями (2.8), получим  $\varepsilon = Bq$ , (2.19)

где  $B = L\Phi$  – матрица, связывающая деформации с узловыми перемещениями.

Подстановка (2.17), (2.18), (2.19) в (2.4) приводит к уравнению:

$$\delta q^T K q = \delta q^T P, \quad (2.20)$$

где

$$K = \iint_s B^T D B dS; \quad (2.21)$$

$$P = \iint_s \Phi^T p dS + \int_\Gamma \Phi^T \bar{N} d\Gamma. \quad (2.22)$$

Матрица  $K$  – матрица жесткости конечного элемента, вектор  $P$  – вектор приведенных сил. Из-за произвольности компонент вектор столбца  $\delta q$  уравнение (2.15) позволяет получить разрешающую систему алгебраических уравнений  $Kq=P$ . (2.23)

При составлении системы уравнений для всей системы элементов предполагается, что поведение непрерывной криволинейной поверхности достаточно точно характеризуется поведением поверхности, составленной из малых плоских элементов.

Угол поворота  $\theta_z$  не входит в число узловых параметров, определяющих деформации. Тот факт, что  $\theta_z$  не участвует в процессе, учитывается включением соответствующего количества нулей в матрицу жесткости.

Полученная матрица жесткости КЭ (2.23) записана в локальной системе координат, так как компоненты изгибающих и мембранных сил выражены в локальных координатах. Для составления системы конечных элементов необходимо преобразование к глобальным координатам и запись соответствующих уравнений равновесия. Кроме того, координаты узлов тройника удобнее задавать в глобальной системе координат, а затем переходить к локальным координатам, т.е. осуществлять обратное преобразование. В случае использования оболочечных конечных элементов [37,39] преобразование координат необходимо только на линии пересечения патрубка и основной трубы (в наиболее нагруженной зоне).

Узловые силы и перемещения преобразуются из глобальной в локальную систему координат с помощью матрицы  $[L]: \{\delta'_i\} = [L]\{\delta_i\}, \{f'_i\} = [L]\{f_i\},$  (2.24)

где 
$$[L] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

а  $[\lambda]$  представляет собой матрицу размерности  $3 \times 3$  косинусов углов между

осями этих систем, т.е.

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_{x'x} & \lambda_{x'y} & \lambda_{x'z} \\ \lambda_{y'x} & \lambda_{y'y} & \lambda_{y'z} \\ \lambda_{z'x} & \lambda_{z'y} & \lambda_{z'z} \end{bmatrix}, \quad (2.26)$$

где  $\lambda_{x'x}$  – косинус угла между осями  $x'$  и  $x$  и т.д.

При этом удобно направить одну из сторон прямоугольного элемента и соответствующую ось локальных координат параллельно глобальной оси.

Матрица жесткости элемента в глобальных координатах принимает вид:

$$[k] = [T]^T [k'] [T], \quad (2.27)$$

где

$$[T] = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & \dots \\ 0 & L & 0 & \dots \\ 0 & 0 & L & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

и является диагональной матрицей, составленной из нескольких матриц  $[L]$ , количество которых равно числу узлов элемента.

Определение локальных координат осуществляется аналогичным образом:

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [\lambda] \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}. \quad (2.29)$$

После получения матриц жесткости всех элементов в общей глобальной системе координат формируется глобальная матрица жесткости и решается система алгебраических уравнений. В результате искомые перемещения определяются в глобальной системе координат, и для определения напряжений необходимо в каждом элементе перейти к локальным координатам.

После определения обобщенных перемещений в локальных координатах вычисляются деформации в КЭ:  $\varepsilon = Bq$  (2.30)

Деформации элемента преобразуются к деформациям слоя в системе координат элемента следующим соотношением:

$$\{\varepsilon_{pxy}\} = \{\varepsilon_e\} + z \{\kappa_e\} \quad (2.31)$$

где:  $\{\varepsilon_{pxy}\}$  = деформации в слое  $\{\varepsilon_{px}, \varepsilon_{py}, \gamma_{pxy}\}$ ,

$\{\varepsilon_e\}$  = деформации элемента  $\{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}\}$ ,

$z$  = расстояние от нейтральной оси до центра слоя (рис. 2.4),

$\{k_e\}$  = кривизна элемента  $\{k_x, k_y, k_{xy}\}$ .

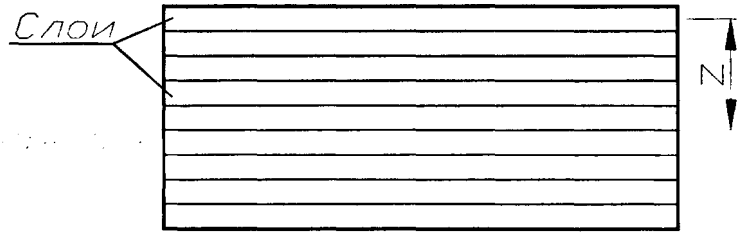


Рис.2.4 Расположение слоев относительно нейтральной оси

Деформации слоя необходимо пересчитать в систему координат слоя:

$$\{\varepsilon_p\} = [T] \{\varepsilon_{pxy}\} \quad (2.32)$$

$$\text{где } [T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & sc \\ s^2 & c^2 & -sc \\ -2sc & 2sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix},$$

где  $s = \sin \theta$ ,  $c = \cos \theta$ ,  $\varepsilon_{\{pxy\}}$  = деформации слоя  $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}\}$ .

По деформациям в слое вычисляются напряжения в слое, используя закон

$$\text{Гука и матрицу жесткости: } \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & 0 \\ g_{12} & g_{22} & 0 \\ 0 & 0 & g_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (2.33)$$

При расчетах в качестве основного критерия используются максимально допустимые напряжения материала тройника для каждого из слоев  $(\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12})$ .

Для уточненной проверки использовалась теория Хоффмана, которая учитывает сдвиг и пределы прочности на растяжение и сжатие в направлении волокна и матрицы, а критерий прочности записывается как:

$$\left( \frac{1}{\sigma_1^+} - \frac{1}{\sigma_1^-} \right) \sigma_{1(\text{расч.})} + \left( \frac{1}{\sigma_2^+} - \frac{1}{\sigma_2^-} \right) \sigma_{2(\text{расч.})} + \frac{\sigma_{1(\text{расч.})}^2}{\sigma_1^+ \sigma_1^-} + \frac{\sigma_{2(\text{расч.})}^2}{\sigma_2^+ \sigma_2^-} + \frac{\sigma_{1(\text{расч.})} \cdot \sigma_{2(\text{расч.})}}{\sigma_1^+ \sigma_2^-} + \frac{\tau_{12(\text{расч.})}^2}{\tau_{12}^2} \leq 1 \quad (2.34)$$

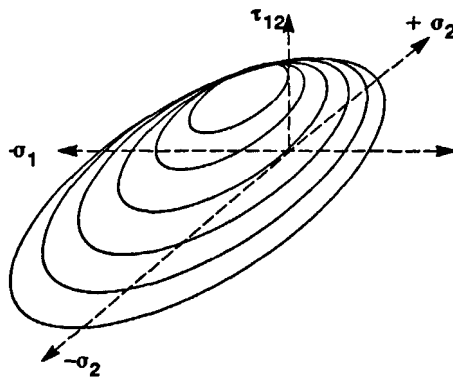


Рис.2.5. Эллипсоид в пространстве  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$  в пределах которого напряжения являются допустимыми



Геометрический вид области допустимых напряжений в соответствии с теорией Хоффмана показан на рис.2.5.

В результате анализа существующих конечных элементов: оболочечных [37-39] и плоских [40, 43-45, 47, 50] были выбраны с позиций приемлемости по времени расчета и точности получаемых результатов КЭ из программного комплекса MSC/Nastran. В MSC/Nastran имеются элементы с линейной аппроксимацией перемещений: CTRIA3 (трехузловой), CQUAD4 (четырёхузловой) и с квадратичной аппроксимацией: CTRIA6 (шестиузловой), CQUAD8 (восьмиузловой четырёхугольник с аппроксимацией перемещений квадратичными серендиповыми функциями) (рис.2.6). Все элементы плоские и имеют в узлах 6 узловых перемещений  $u=[u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]$ . В случае если все конечные элементы расположены в одной плоскости, принимается что  $\theta_z=0$  и матрица жесткости элемента имеет меньшую размерность (например, 40x40 вместо 48x48 для CQUAD8).

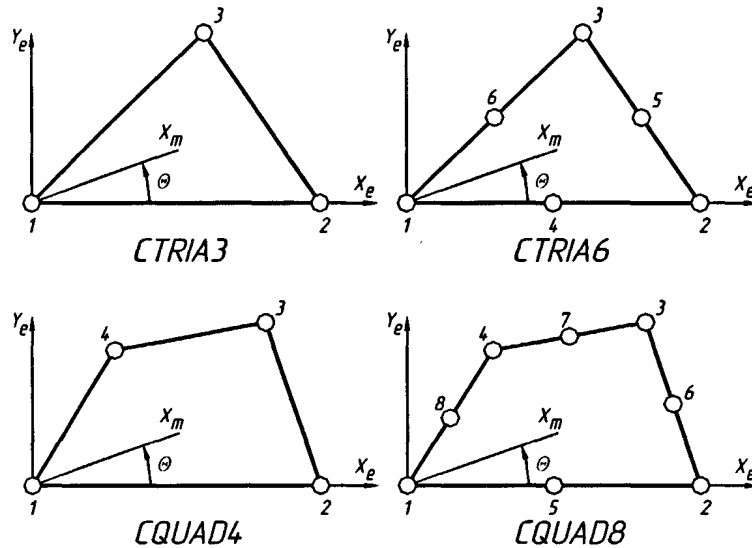


Рис.2.6 КЭ различной формы

В использованном для расчетов конечном элементе CQUAD8 матрица функций формы  $\Phi$  (2.14) имеет размерность (5x40) и в блочном матричном виде записывается следующим образом:

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_8], \quad (2.35)$$

где  $\Phi_i = \phi_i E$ ;  $E$  – единичная матрица размерности (5x5);  $\phi_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ ) –

квадратичные функции формы.

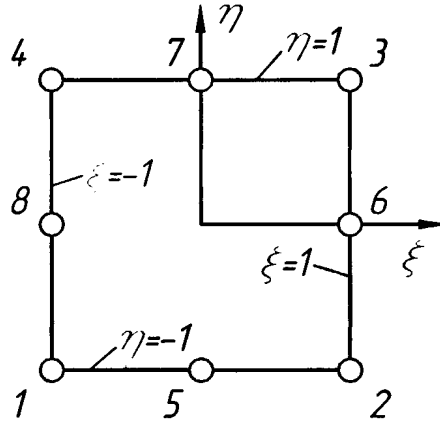


Рис. 2.7. КЭ CQUAD8 в изопараметрических координатах

Для изопараметрического прямоугольного элемента (рис.2.7) функции формы записываются в виде:

$$\begin{aligned}
 \phi_1 &= (1/4)(1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1); & \phi_2 &= (1/4)(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1); \\
 \phi_3 &= (1/4)(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1); & \phi_4 &= (1/4)(1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1); \\
 \phi_5 &= (1/2)(1-\xi^2)(1-\eta); & \phi_6 &= (1/2)(1+\xi)(1-\eta^2); \\
 \phi_7 &= (1/2)(1-\xi^2)(1+\eta); & \phi_8 &= (1/2)(1-\xi)(1-\eta^2).
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

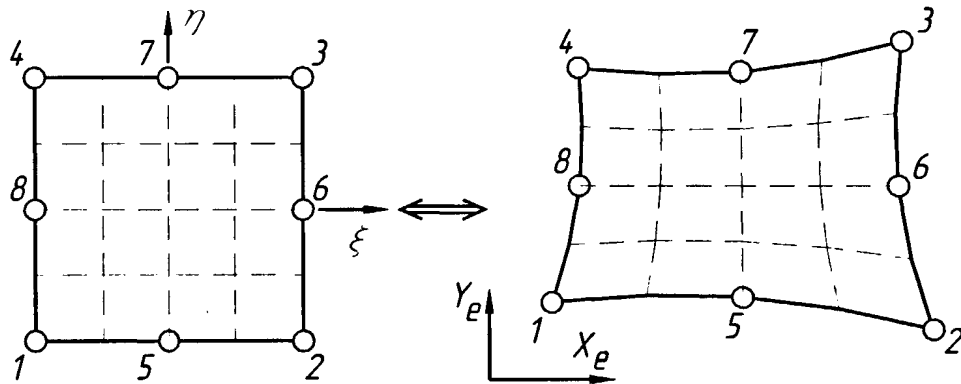


Рис. 2.8. Изопараметрическое отображение КЭ CQUAD8

Зависимость между локальными координатами элемента  $(\xi, \eta)$  и глобальными координатами  $(x, y)$  (рис. 2.8) записывается с использованием интерполяции того же вида, что и применяемая для аппроксимации перемещений.

$$\begin{aligned}
 x &= \phi_1 x_1 + \phi_2 x_2 + \dots + \phi_8 x_8, \\
 y &= \phi_1 y_1 + \phi_2 y_2 + \dots + \phi_8 y_8.
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

В зоне пересечения патрубка и основной трубы также использовались треугольные КЭ STRIA6. Матрица функций формы  $\Phi$  имеет размерность

(5x30) и в блочном матричном виде записывается:

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_6], \quad (2.38)$$

где  $\Phi_i = \phi_i E$ ;  $E$  – единичная матрица размерности (5x5);  $\phi_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ ) – квадратичные функции формы. Для представления  $\phi_i$  используются естественные безразмерные координаты [38,49].

$$\begin{aligned} \phi_1 &= L_1(2L_1 - 1); & \phi_2 &= L_2(2L_2 - 1); & \phi_3 &= L_3(2L_3 - 1); \\ \phi_4 &= 4L_1L_2; & \phi_5 &= 4L_2L_3; & \phi_6 &= 4L_3L_1. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Естественные координаты  $L_i$  определяются через координаты  $x_1, x_2$  следующим образом:

$$L_i = \frac{1}{2S} (a_{(i)} + b_{(i)}x_1 + c_{(i)}x_2) \quad (i=1, 2, 3), \quad (2.40)$$

где

$$a_{(i)} = x_{1(2)}x_{2(3)} - x_{1(3)}x_{2(2)}, \quad (1, 2, 3);$$

$$b_{(i)} = x_{2(2)} - x_{2(3)}, \quad (1, 2, 3);$$

$$c_{(i)} = x_{1(3)} - x_{1(2)}, \quad (1, 2, 3);$$

$$2S = b_{(1)}c_{(2)} - b_{(2)}c_{(1)};$$

$x_{1(i)}, x_{2(i)}$  ( $i=1, 2, 3$ ) – координаты  $x_1$  и  $x_2$  вершин треугольника. Коэффициенты  $a_{(i)}$ ,  $b_{(i)}$ ,  $c_{(i)}$  получаются с помощью круговой перестановки индексов, заключенных в круглые скобки. Коэффициент  $S$  равен площади треугольного элемента.

Компоненты вектора перемещений  $u = [w, \theta_x, \theta_y, u_x, u_y]^T$  и угол поворота нормали удовлетворяют условиям непрерывности на границе между элементами, лежащими в одной плоскости. Но в общем случае дают разрывные перемещения, если происходит сдвиг плоскостей элементов. В частности разрыв возможен на линии пересечения патрубка и основной трубы тройника. Таким образом, конечно-элементная аппроксимация оболочек плоскими элементами основана на несогласованных функциях перемещений, и её сходимость можно подтвердить только экспериментально. Если в реальной оболочке разрывов не возникает, то при уменьшении размеров элементов несогласованность становится меньше, и

ошибки аппроксимации реальной формы плоскими элементами и использования несогласованных функций исчезают [50].

Сходимость решения системы уравнений (2.23) к точному определяется, прежде всего, правильностью выбора функций формы  $\Phi$ . Кроме того, факторами, влияющими на сходимость решения, являются погрешности дискретизации реальной конструкции и погрешности округления при решении системы уравнений большого порядка. Если в качестве базисных функций для конечных элементов выбраны полные полиномы степени  $m$  и область интерполяции имеет равномерную разбивку с характерным размером конечного элемента  $h$ , то максимальную асимптотическую (при  $h \rightarrow 0$ ) погрешность по энергетической норме можно оценить как [38]:

$$\|\Delta u\| = ch^{m-p+1}, \quad (2.41)$$

где  $p$  – максимальный порядок дифференциальных операторов, содержащихся в матрице  $L$  (2.6), с помощью которой определена норма;

$c$  – константа, зависящая от точного решения задачи и не зависящая от  $h$ .

В тоже время с уменьшением  $h$  происходит увеличение погрешности округления, так как она пропорциональна величине  $ch^{-2m}$ , где  $c$  – число, зависящее от степени интерполирующих функций. Следовательно, при выборе функций форм элементов и степени интерполяционных полиномов необходим анализ, исходящий из желаемой точности решения и числа элементов, требуемого для аппроксимации сложных геометрических форм.

Для анализа НДС тройника напряжения определяются для каждого КЭ в центре и в углах КЭ. Напряжения в вершинах, определенных по элементам, имеющим общие узлы не всегда идентичны. Эта разница ярко выражена для грубых моделей и менее – для моделей с подробной дискретизацией. По усредненным значениям напряжений в узловых точках и их отклонениям напряжений от средних значений можно оценить точность дискретизации модели. Для этого необходимо преобразовать локальные напряжения в элементах в общую систему координат, например в глобальную. Средние значения напряжений для угловых точек рассчитываются по

$$\text{формуле: } \sigma_i = \frac{1}{N_i} \sum_{e=1}^{N_e} \sigma_{ei}, \quad (2.42)$$

где  $\sigma_e$  - усредненное напряжение в узловой точке,

$N_e$  - число непосредственно соединённых элементов,

$\sigma_{ei}$  - напряжения в вершинах элементов.

Инварианты напряжений в узловых точках (например, эквивалентные напряжения по Мизесу) определяются по усредненным компонентам напряжений в узловых точках.

В зоне пересечения труб возникают разрывы напряжений, вызванные существенной разницей в наклонах соседних элементов. Для узлов расположенных на линии пересечения, средние значения напряжений рассчитываются отдельно для патрубка и основной трубы.

Оценка погрешностей для одного из компонент напряжений в узловой точке может быть потом быть вычислена в предположении, что значения компонент напряжений, вычисленных для элементов в соседних узловых точках есть данные с некоррелированными случайными ошибками. Отсюда следует, что оценка возможной погрешности для компонента напряжений  $\delta_g$  в узловой

$$\text{точке равно: } \delta_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_e} (\delta_{ei})^2}{N_e}}, \quad (2.43)$$

где  $\delta_{ei} = \sigma_{ei} - \sigma_g$ , то есть возможная ошибка  $\delta_g$  есть среднеквадратичная ошибок  $\delta_{ei}$ , деленная на  $\sqrt{N_e}$ .

Аналогично можно оценить погрешность, ассоциированную не с узловыми

$$\text{точками, а с элементами: } \delta_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_g} (\delta_{ei})^2}{N_g}}, \quad (2.44)$$

где  $\delta_{ei} = (\sigma_e - \sigma_{gi})$  вычисляется для каждой из узловых точек.

При аппроксимации цилиндрической поверхности плоскими конечными элементами поверхность одинарной кривизны замещается плоскими поверхностями (рис.2.9).

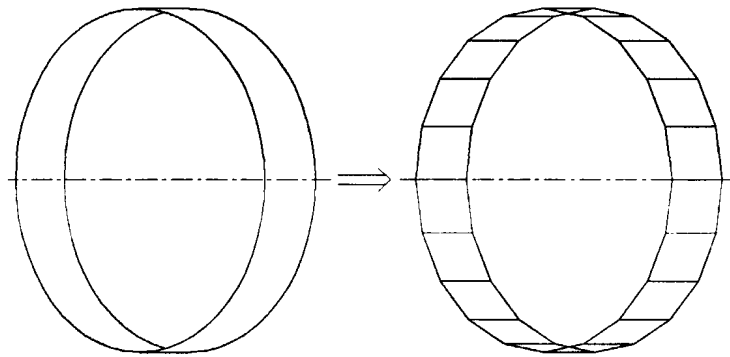


Рис.2.9 Представление цилиндрической поверхности при расчете плоскими КЭ

Для оценки погрешности, возникающей при изгибе в окружном направлении, рассмотрим следующую задачу:

Пример 1. Определим перемещения в кольце, нагруженном двумя противоположно направленными силами  $P=1 \cdot l$ .

$l$  - длина кольца,  $h=1$  - толщина,  $r=50$  - радиус.

Характеристики материала:  $E_1=1 \cdot 10^5$ ;  $E_2=\infty$

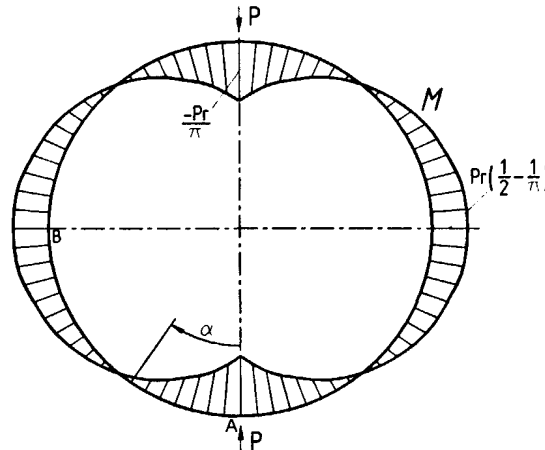


Рис.2.10 Эпюра изгибающего момента в кольце, нагруженном двумя силами P

Изгибающий момент (рис.2.10) и перемещения в кольце равны [52]:

$$M = Pr \cdot \left( \frac{1}{2} \sin \alpha - \frac{1}{\pi} \right), \quad w = \frac{P \cdot r^3}{E \cdot J} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{\sin \alpha}{4} + \frac{(2\alpha - \pi)}{8} \cos \alpha \right).$$

В точках А ( $\alpha=0$ ) и В ( $\alpha=\pi/2$ ) прогиб соответственно равен:

$$\alpha = 0 \quad w = \frac{1 \cdot 50^3}{10^5 \cdot \frac{1}{12}} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{\pi}{8} \right) = -1,1186$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \quad w = \frac{1 \cdot 50^3}{10^5 \cdot \frac{1}{12}} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{\sqrt{2}}{8} - \frac{\pi}{16} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 0,0404$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad w = \frac{1 \cdot 50^3}{10^5 \cdot \frac{1}{12}} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{1}{4} \right) = 1,0246$$

Результат решения методом конечных элементов с использованием КЭ

MSC/Nastran CQUAD4 и CQUAD8 представлен в таблице 6.

Табл. 6

Прогиб в точках А ( $\alpha=0$ ) и В ( $\alpha=\pi/2$ ) в зависимости от числа КЭ

		Число КЭ вдоль $\frac{1}{4}$ окружности		
		5	9	18
$\alpha=0$	CQUAD4	0,983	1,021	1,022
	CQUAD8	1,021	1,020	1,024
$\alpha=\pi/4$	CQUAD8	0,0411	0,0410	0,0404
$\alpha=\pi/2$	CQUAD4	1,072	1,113	1,114
	CQUAD8	1,119	1,119	1,117

Таким образом, при числе КЭ вдоль  $\frac{1}{4}$  окружности 9 погрешность расчета методом конечных элементов составляет менее 0,4%.

Пример 2. Для оценки погрешности расчета прогиба при различном числе КЭ вдоль образующей рассмотрим цилиндрическую оболочку, заделанную по торцам и нагруженную равномерным давлением (рис.2.10).

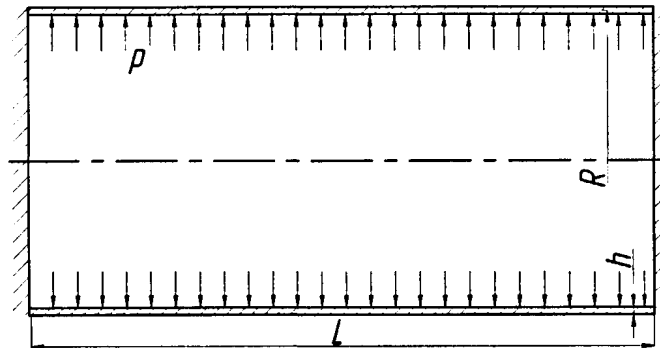


Рис. 2.11

Цилиндрическая оболочка была разделена на различное число одинаковых прямоугольных конечных элементов вдоль  $\frac{1}{2}$  образующей и  $\frac{1}{4}$  части окружности (рассматривалась  $\frac{1}{8}$  цилиндра в силу симметрии). Длина цилиндра равна радиусу  $L=R=254$  мм, толщина оболочки  $h=12,7$  мм, коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$ , модуль упругости материала  $E=7 \cdot 10^4$  МПа, давление  $p=7 \cdot 10^3$  МПа. В табл.7 приведены максимальные радиальные перемещения  $w$  при разном числе элементов.

Табл.7

Максимальные радиальные перемещения в цилиндре в зависимости от числа КЭ.

		Число КЭ				
		2x2	3x3	4x4	5x5	6x6
$w \cdot 10^{-4}$ , мм	CQUAD4	5,237	5,211	5,172	5,151	5,140
	CQUAD8	5,243	5,139	5,126	5,125	5,124

При числе элементов 4x4 CQUAD4 и 3x3 у CQUAD8 значение максимального перемещения близко к аналитическому решению  $w=5,1486 \cdot 10^{-4}$  мм [46].

1. Основные геометрические соотношения тройникового соединения. Для проведения расчета методом конечных элементов необходимо составить геометрическую модель конструкции. На рис. 2.11 изображена геометрия тройникового соединения для тонкостенных труб. Обозначим через  $R$  радиус срединной поверхности основной трубы, а через  $r$  радиус срединной поверхности патрубка. Свяжем с соединением "тройник" декартовую систему координат так, чтобы оси  $x$  и  $z$  совпадали с центральными осями цилиндров. В декартовых координатах запишем следующие уравнения:

- срединной поверхности основной трубы  $y^2 + z^2 = R^2$
- срединной поверхности патрубка  $x^2 + y^2 = r^2$
- линии пересечения цилиндров  $\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ y^2 + z^2 = R^2 \end{cases}$

Совместим с линиями главных кривизн срединных поверхностей цилиндров криволинейные оси координат  $r, t, r_1$  и  $R, T, r_2$ , а оси направим по нормали к соответствующим поверхностям.

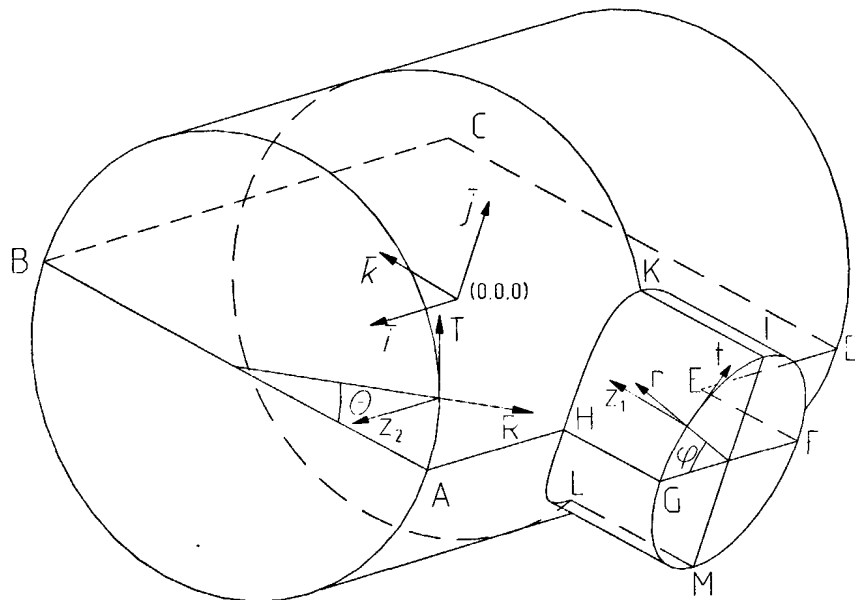


Рис.2.12 Геометрия и система координат тройникового соединения

Выясним зависимость между угловыми координатами  $\varphi$  и  $\theta$  по линии



пересечения цилиндров.

В цилиндрических координатах:

для основной трубы  $y = R \sin \theta$ ,

где  $\theta$  - угловая координата поверхности основной трубы.

для патрубка  $y = r \sin \varphi$ ,

где  $\varphi$  - угловая координата поверхности патрубка.

Из этих выражений получим:  $\sin \theta = m \cdot \sin \varphi$

где  $m = r/R$  - безразмерный параметр.

**1. Разбиение конструкции на элементы, задание начальных и граничных условий для расчета.** При расчете конструкции методом конечных элементов, в первую очередь, необходимо рассматриваемую конструкцию разбить на дискретные элементы, взаимодействующие в отдельных узловых точках, т.е. составить геометрическую модель конструкции. Под делением на элементы будем понимать вычисление размеров конечных элементов в зависимости от геометрических размеров соединения. Так как "тройник" имеет две плоскости симметрии (ABCDEFGH и IKLM), расчетная схема составляется лишь для четверти конструкции. Линии деления совмещаем с линиями главных кривизн. При этом образуются прямоугольные элементы.

Для деления используем нерегулярную сетку со сгущением в предполагаемой зоне возмущения.

Разобьем срединную поверхность патрубка в окружном направлении на равные части (для четверти окружности примем  $M$  равных частей). Тогда угловая координата точек деления определяется следующим выражением:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \pi / 2M, (\varphi_1=0, i=1, \dots, M).$$

Вдоль образующей патрубка: для первого элемента от линии пересечения задаём длину, далее делим на равные части. Всего имеем  $(K+1)$  элементов вдоль образующей.

Размеры конечных элементов, относящиеся к основной трубе, в зоне пересечения зависят от размеров патрубка следующим образом:

$$\theta_{i+1} = \arcsin(m \cdot \sin \varphi_{i+1}), \quad (\theta_1=0, i=1, \dots, M), \theta_M = \arcsin(m)$$

$\theta$  - окружная координата основной трубы.

Для основной трубы вне зоны соединения предусматривается нерегулярное деление: в зоне до  $\theta=\pi/2$  размер каждого последующего элемента от линии пересечения равен удвоенному размеру предыдущего элемента. В этой зоне  $\left[ \left(1 - \frac{2\theta_M}{\pi}\right)M \right]^2 - 1$  элементов.

Далее срединную поверхность основной трубы делим в окружном направлении на равные части (для четверти окружности примем  $M$  равных частей).

Вдоль образующей основной трубы: для первого элемента от линии пересечения задаём длину, далее делим на равные части. Всего имеем  $(N+1)$  элементов вдоль образующей.

С каждой цилиндрической системой координат свяжем ортогональные базисы  $\bar{e}_i$  и  $\bar{e}'_i$  уравнения ортов которых в декартовой системе координат имеют вид:

- орты базиса, связанного с основной трубой:
 
$$\begin{aligned} \bar{e}_1 &= -\bar{i}, \\ \bar{e}_2 &= \cos \theta \bar{j} - \sin \theta \bar{k}, \\ \bar{e}_3 &= \sin \theta \bar{j} + \cos \theta \bar{k}; \end{aligned}$$
- орты базиса, связанного с патрубком
 
$$\begin{aligned} \bar{e}_1' &= -\bar{k}, \\ \bar{e}_2' &= -\sin \varphi \bar{i} + \cos \varphi \bar{j}, \\ \bar{e}_3' &= \cos \varphi \bar{i} + \sin \varphi \bar{j}; \end{aligned}$$

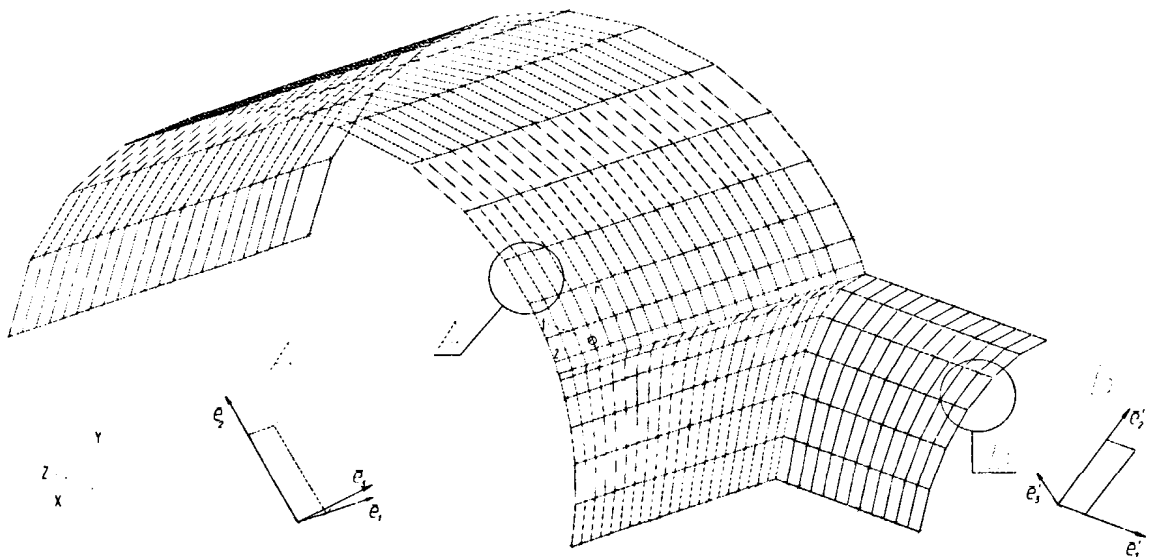


Рис.2.13. Разбиение тройника на КЭ

В системах координат, построенных на этих базисах, задаются углы армирования для слоёв конечного элемента и граничные условия. Системы координат и разбиение на КЭ представлены на рис.2.13.

#### Граничные условия.

Зададим по плоскостям ABCDEFGH и IKLM условия симметрии в глобальной декартовой системе координат:

ABCDEFGH:  $y=0$ , IKLM:  $x=0$ .

Граничные условия на фланцах удобно задавать, используя цилиндрические системы координат, связанные с основной трубой и патрубком: AB:  $T=0$ , IG:  $t=0$ .

В общем случае для MSC/Nastran в каждом узле имеется 6 степеней свободы: 3 перемещения: TX, TY, TZ и 3 поворота относительно соответствующих осей: RX, RY, RZ. При этом можно использовать декартовые, цилиндрические и сферические системы координат.

## **2. Оценка достоверности расчета на основе принятых КЭ**

Пример №3. Сравним результаты расчета с применением многослойных элементов с результатами расчета с применением КЭ для изотропного материала. Для проверки достоверности используем данные из диссертации Куликова Ю.А. Для этого зададим многослойный элемент, состоящий из 10 слоёв изотропного материала. При этом напряжения в первом слое соответствуют напряжениям на внутренней поверхности, а напряжения в 10 слое - напряжениям на наружной поверхности.

Используем геометрические размеры, представленные в табл.8.

Табл.8

Геометрические размеры тройникового элемента

R (мм)	H (мм)	r (мм)	h (мм)	r/R	R/H	r/h
127	2,54	63,5	1,27	0,5	50	50

Здесь R, H - радиус и толщина основной трубы.

r, h - радиус и толщина патрубка.

Предположим, что материал тройника имеет одинаковые механические



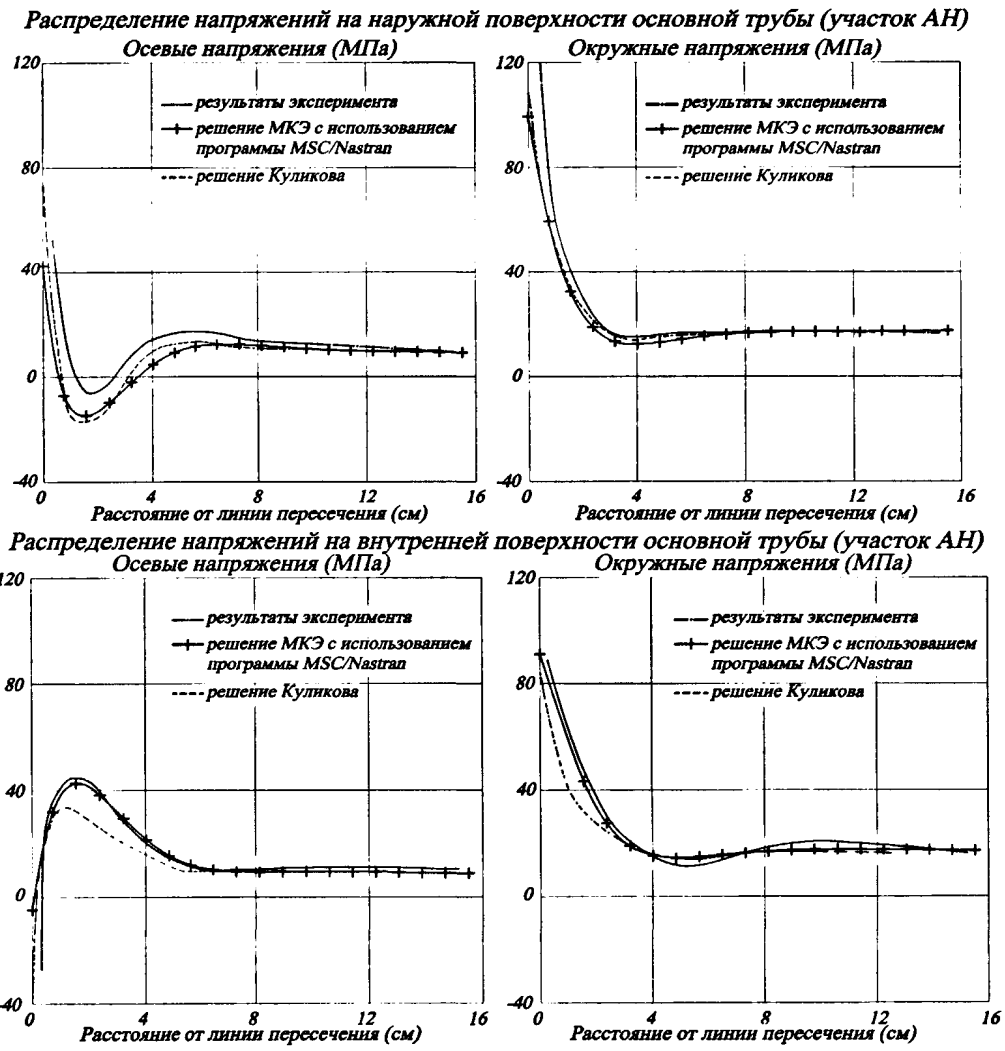


Рис.2.15. Распределение напряжений на поверхности основной трубы (участок АН) от внутреннего давления  $p=0,3515\text{МПа}$  по данным работы Куликова Ю.А. [37] и с использованием программы MSC/Nastran

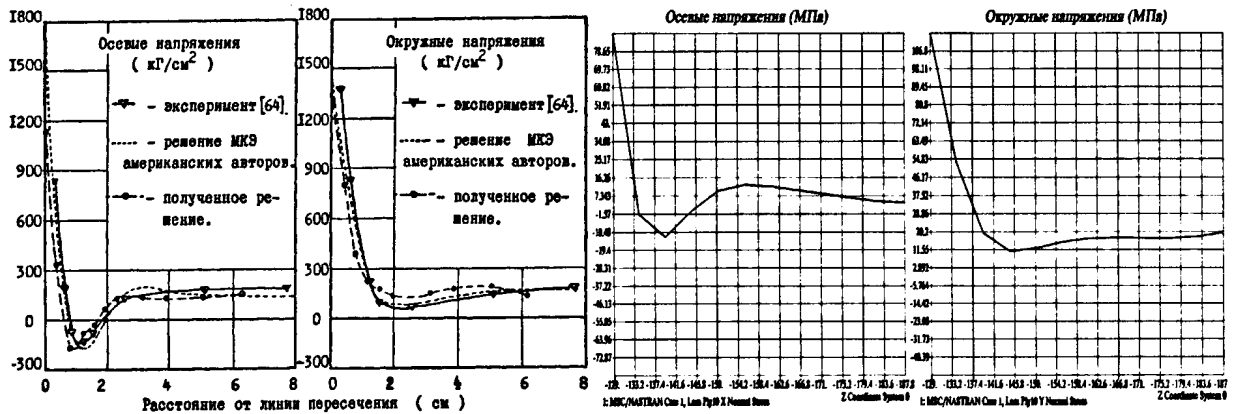


Рис.2.16. Распределение напряжений на наружной поверхности патрубка (участок GH) от внутреннего давления  $p=0,3515\text{МПа}$ . а) по данным работы Куликова Ю.А. [37] б) с использованием программы MSC/Nastran

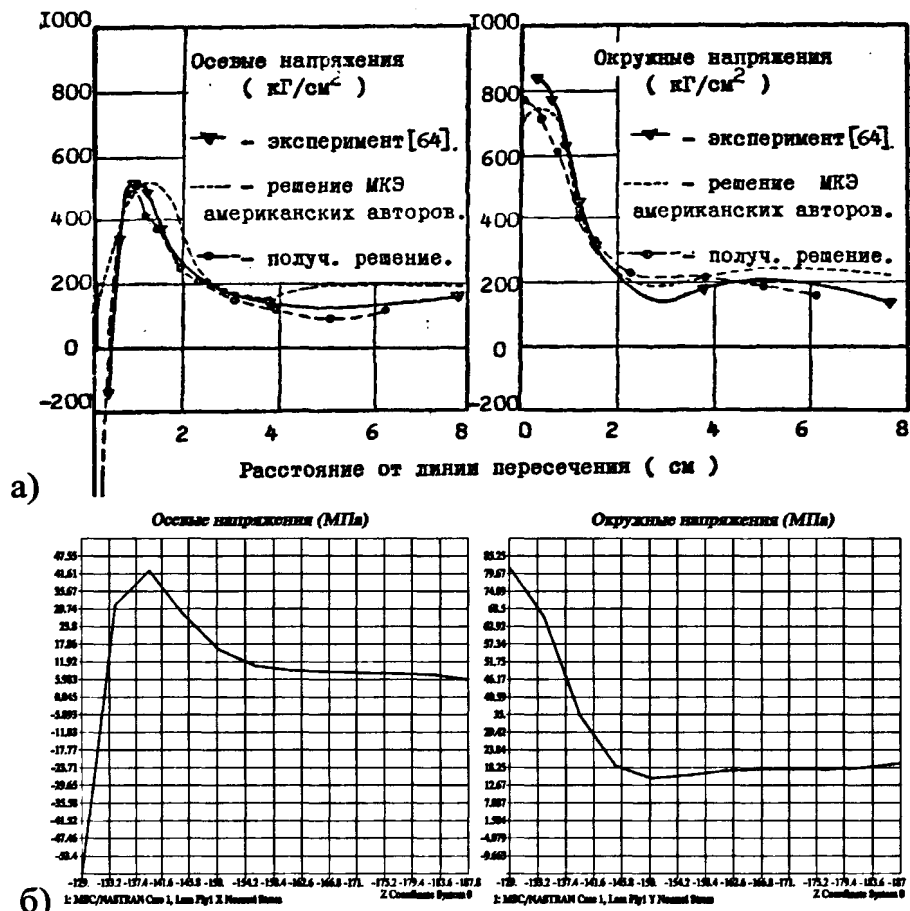


Рис.2.17. Распределение напряжений на внутренней поверхности патрубка (участок GH) от внутреннего давления  $p=0,3515$  МПа. а) по данным работы Куликова Ю.А. [37] б) с использованием программы MSC/Nastran

Проведем статистическую оценку погрешности определения напряжений. Для тройникового соединения трубопроводов можно таким методом провести оценку достоверности напряжений вдоль осей труб и эквивалентных напряжений по Мизесу.

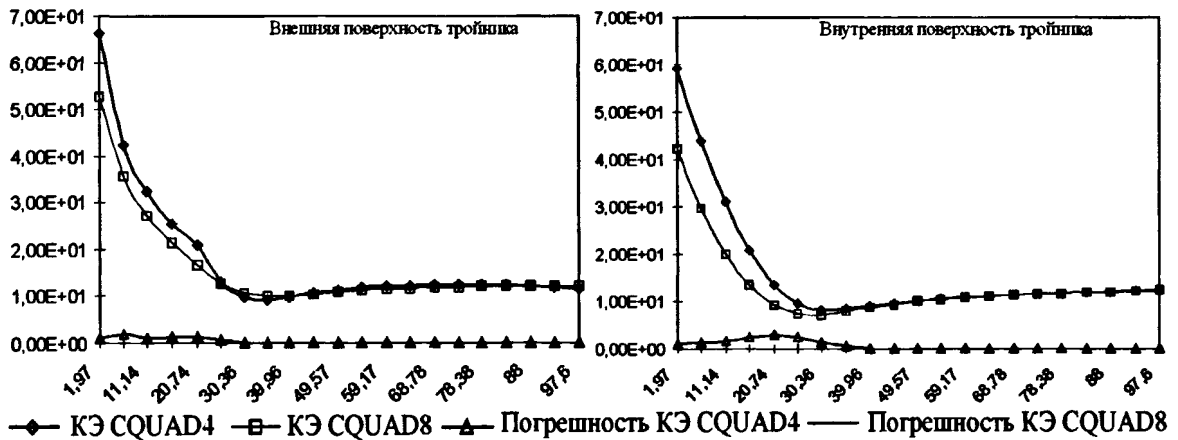


Рис.2.18. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу от внутреннего давления и оценка погрешности на участке АН

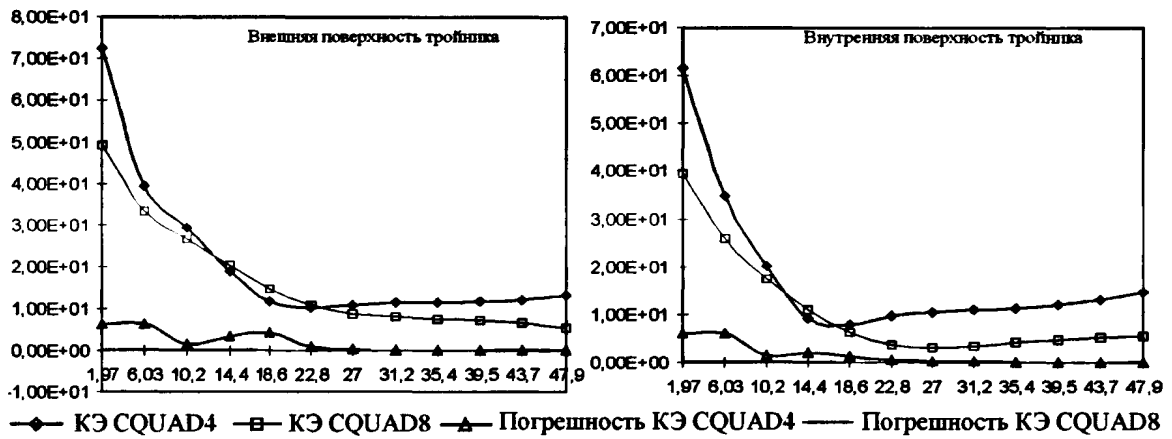


Рис.2.19. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу от внутреннего давления и оценка погрешности на участке GH

Погрешность расчета напряжений с использованием КЭ с линейной аппроксимацией перемещений CQUAD4 составляет в среднем 2,5-3% (максимально до 10%). Применение КЭ с квадратичной аппроксимацией перемещений снижает погрешность до 0,5%. Как видно на рис. 2.18, 2.19. использование более грубой аппроксимации перемещений приводит к завышению уровня напряжений в тройнике.

Пример №4. Проведем расчет, используя вместо изотропного материала композит. Соответственно изменим свойства материала и конечных элементов:

Материал обеих труб считаем одинаковым (углепластик) с механическими характеристиками:  $E_1 = 1,34 \times 10^5$  МПа,  $E_2 = 5 \times 10^3$  МПа,  $G_{12} = 5 \times 10^3$  МПа,  $G_{13} = 5 \times 10^3$  МПа,  $G_{23} = 5 \times 10^3$  МПа,  $\mu_{12} = 0,33$ .

Для случая композита необходимо также учесть схему армирования.

Для основной трубы примем: схема армирования  $((+45^\circ/-45^\circ)_5)_{\text{СИММ.}}$ ,  $h_{\text{сл.}}=0,127$ мм.

Для патрубка - схема армирования  $((+45^\circ/-45^\circ)_2 90^\circ)_{\text{СИММ.}}$ ,  $h_{\text{сл.}}=0,127$ мм.

Результаты расчета для основной трубы представлены в рис 2.20-2.23.

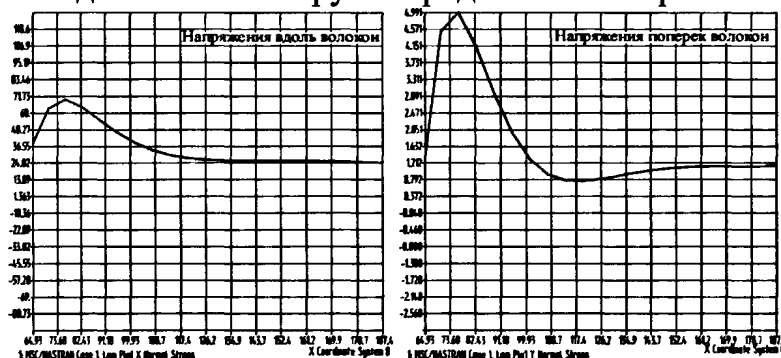


Рис.2.20. Распределение напряжений на нижней поверхности основной трубы в слое 1 (+45°)

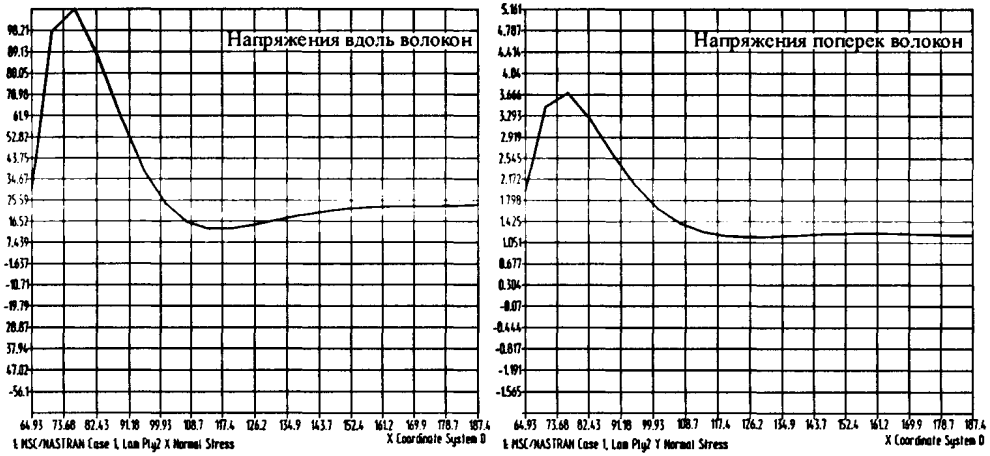


Рис.2.21. Распределение напряжений на нижней поверхности основной трубы в слое 2 (-45°)

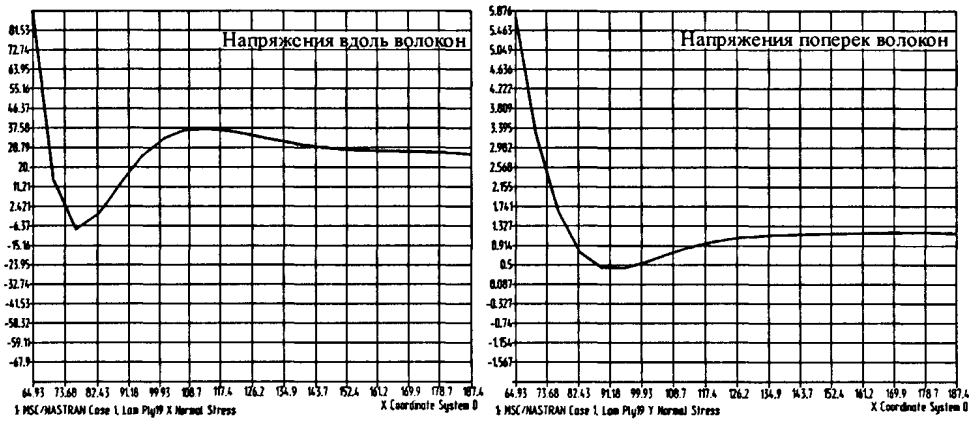


Рис.2.22. Распределение напряжений на верхней поверхности основной трубы в слое 19 (-45°)



Рис.2.23. Распределение напряжений на верхней поверхности основной трубы в слое 20 (+45°)

Пример №5. Чтобы уменьшить уровень напряжений в наиболее нагруженной зоне и соответственно массу тройника имеет смысл в зоне пересечения



основной трубы и патрубка увеличить толщину методом подмотки дополнительных слоёв.

Проведем исследование напряженного состояния тройника с подмоткой в зоне пересечения основной трубы и патрубка и сравним напряженно-деформированное состояние тройника с подмоткой и без.

Расположение элементов и направление системы координат элемента представлено на рис.2.24.

Используем для расчета оболочечные конечные элементы с механическими характеристиками:

$E_1 = 1,34 \times 10^5$  МПа,  $E_2 = 5 \times 10^3$  МПа,  $G_{12} = 5 \times 10^3$  МПа,  $G_{13} = 5 \times 10^3$  МПа,  $G_{23} = 5 \times 10^3$  МПа,  $\mu_{12} = 0,33$  и схемой армирования  $(0^\circ)_{16}$ .

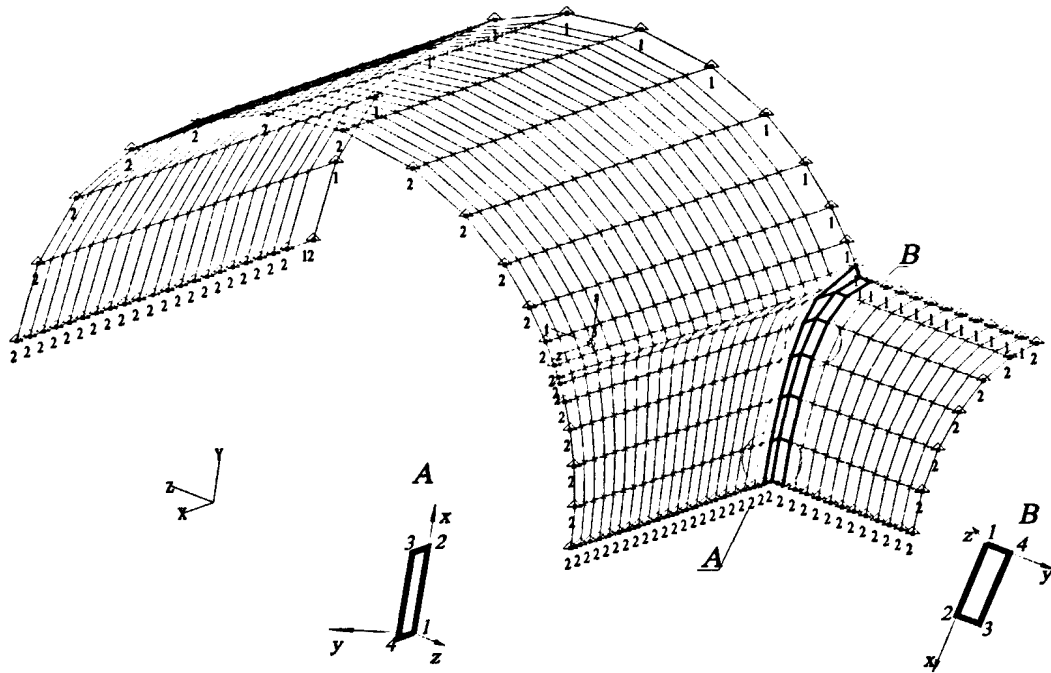


Рис. 2.24. Расположение КЭ в зоне подмотки и их система координат

Если задан отступ КЭ срединной поверхности, и нейтральная поверхность не совпадает со срединной, то при расчете матрицы жесткостных характеристик  $D$  происходит коррекция в матрицах жесткости  $[D_{ij}]$  и  $[C_{ij}]$  (2.8):

$$[D^*] = [D] + 2e[C] + e^2[B]; \quad (2.45)$$

$$[C^*] = [C] + e[B], \quad (2.46)$$

где  $e$  – координата нейтральной поверхности, вычисляющаяся как:

$e = \text{отступ} + (\text{толщина пакета}) / 2$  (рис.2.25).

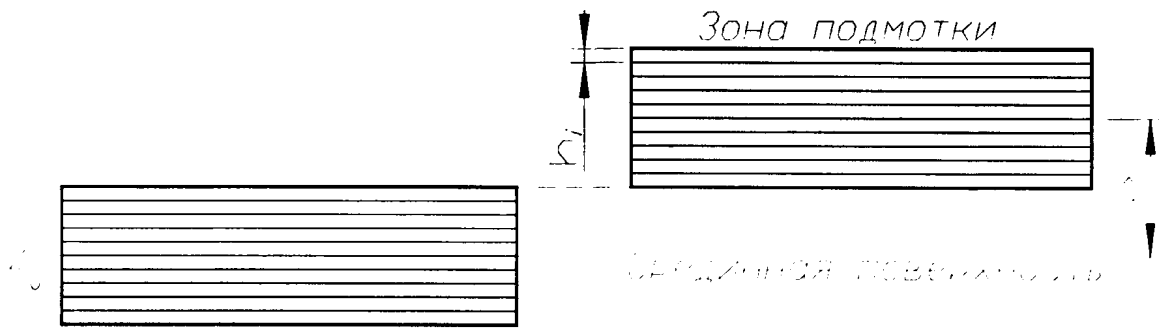


Рис.2.25. Расположение зоны подмотки относительно средней поверхности  
Толщина элемента  $h_c = 16 \times 0,127 = 2,032$ ;

Расстояние от средней поверхности до нижней поверхности дополнительных КЭ  $5 \times 0,127 = 0,635$  (патрубок),  $10 \times 0,127 = 1,27$  мм (основная труба),  $e = (8+5) \times 0,127 = 1,651$ .

Результаты расчета напряженного состояния показаны на рис. 2.26-2.29.

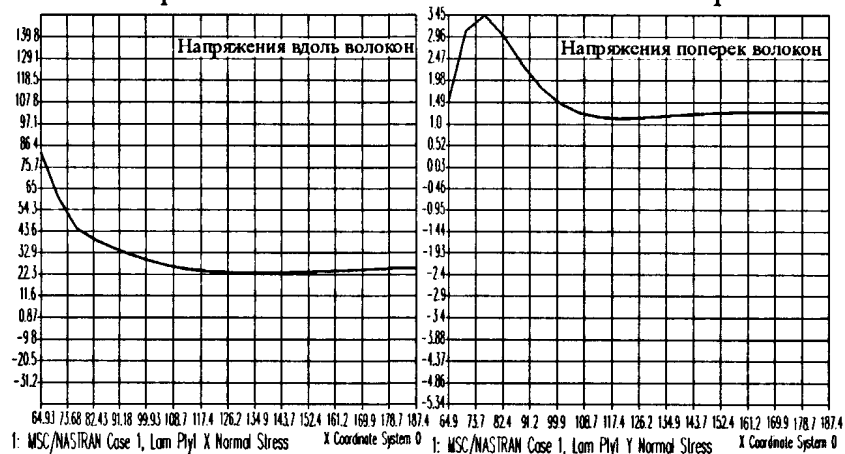


Рис. 2.26. Распределение напряжений на нижней поверхности основной трубы в слое 1 (+45°)

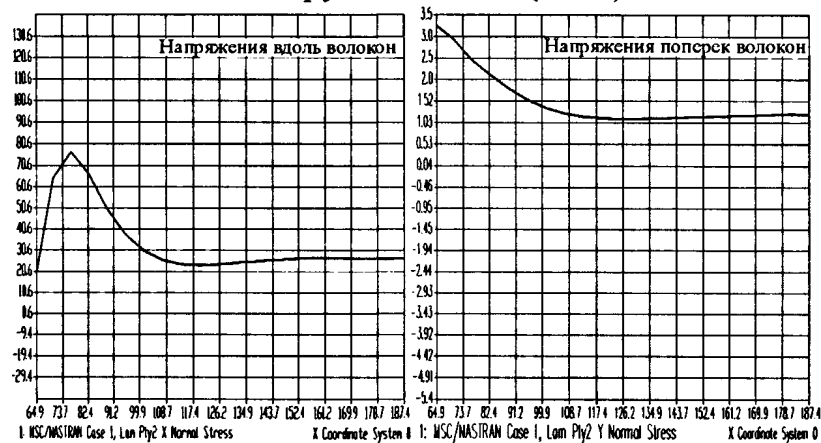


Рис.2.27. Распределение напряжений на нижней поверхности основной трубы в слое 2 (-45°)

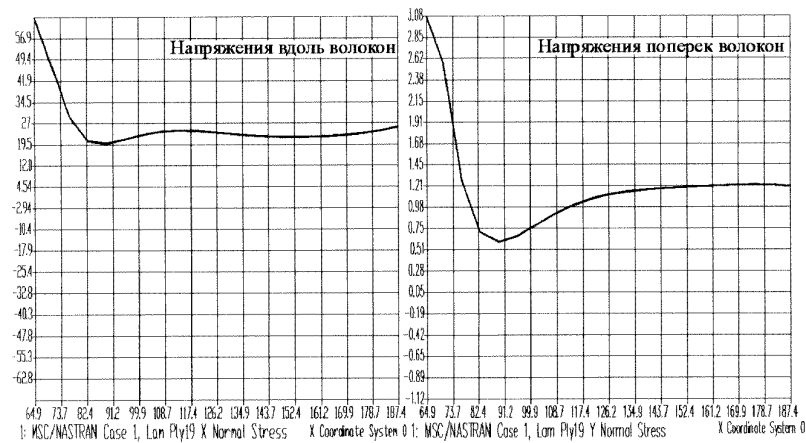


Рис.2.28. Распределение напряжений на верхней поверхности основной трубы в слое 19 ( $-45^\circ$ )

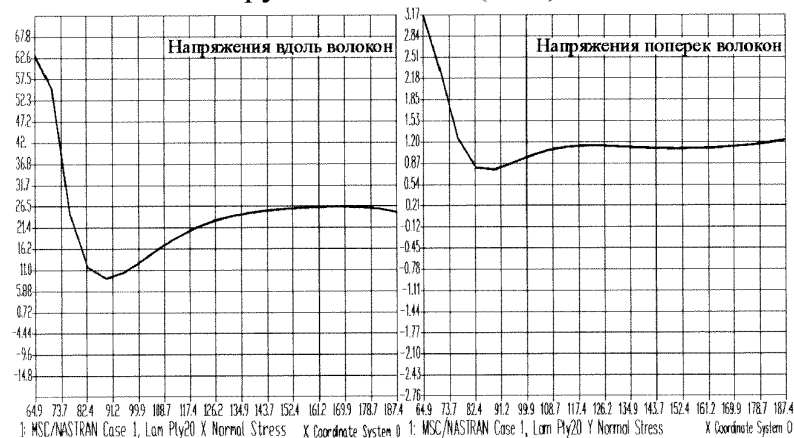


Рис.2.29. Распределение напряжений на верхней поверхности основной трубы в слое 20 ( $+45^\circ$ )

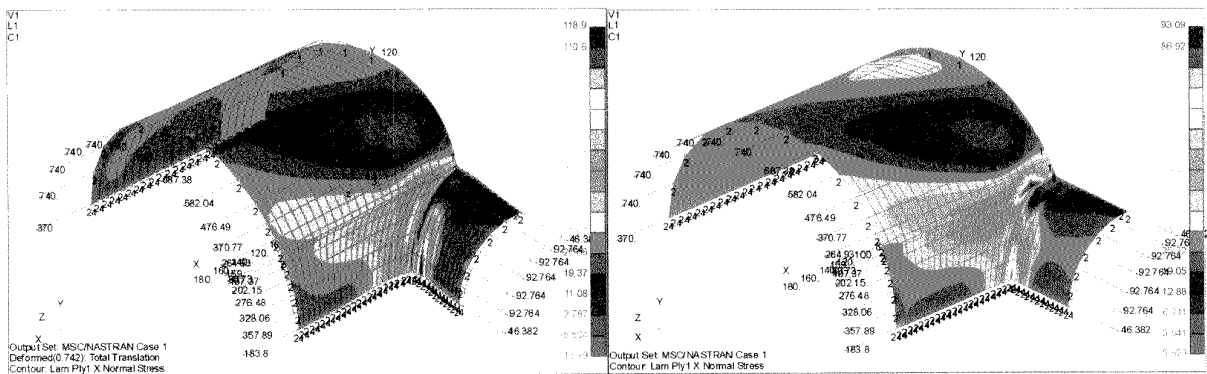


Рис.2.30. Распределение напряжений вдоль волокон на нижней поверхности основной трубы (слой  $+45^\circ$ ) в зоне пересечения труб а) без подмотки б) с подмоткой в зоне пересечения

Сравнение напряженно-деформированного состояния для тройников с усилением в зоне пересечения основной трубы и патрубка (рис. 2.30) показывает, что применение подмотки позволяет понизить уровень напряжений

в силовой оболочке.

Представленная в главе 2 схема армирования - теоретическая и не может быть реализована методом намотки, реализация схемы армирования близкой к рассмотренной возможна только методом выкладки с использованием тканого материала.

Для проверки эффективности применения накладки в зоне пересечения патрубка и основной трубы были проведены расчеты тройника из углепластика (УКН5000+ЭДТ-10) с диаметрами патрубка и основной трубы:  $d=50\text{мм}$ ,  $D=100\text{мм}$  и толщиной:  $h=2\text{мм}$ ,  $H=2\text{мм}$  соответственно для различных схем армирования силовой оболочки:  $(\pm 30^\circ)_n$ ,  $(\pm 40^\circ)_n$ ,  $(\pm 45^\circ)_n$ ,  $(\pm 50^\circ)_n$ ,  $(\pm 55^\circ)_n$ ,  $(\pm 60^\circ)_n$ ,  $(\pm 65^\circ)_n$ ,  $(\pm 70^\circ)_n$ ,  $(\pm 75^\circ)_n$ . В зоне усиления было принято  $h_n=2\text{мм}$ , схема армирования -  $(\pm 45^\circ)_n$ .

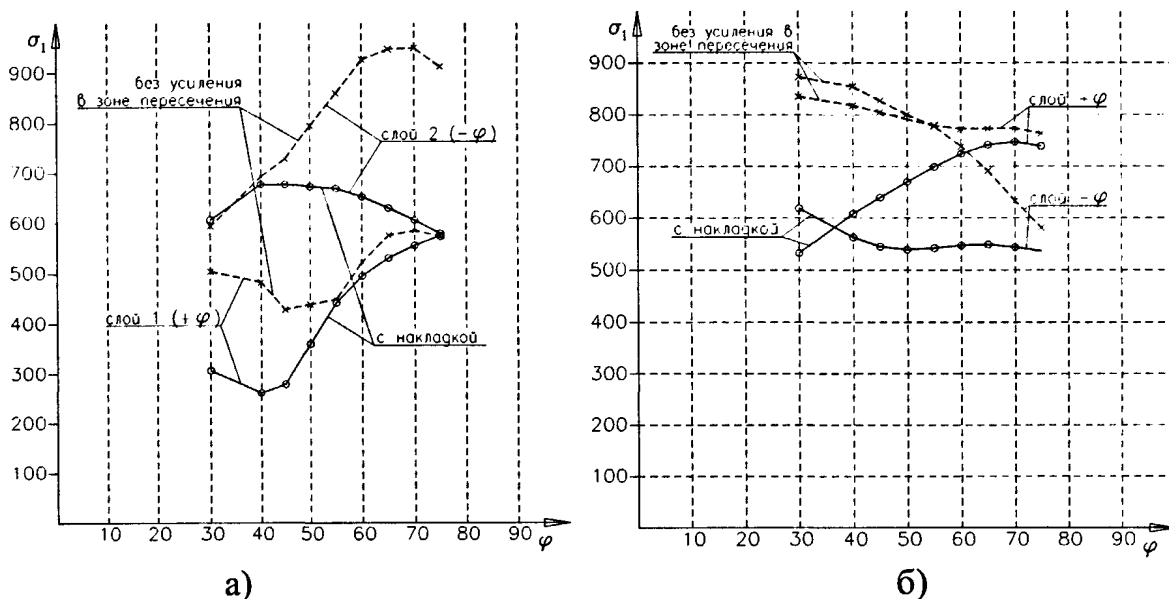


Рис.2.31 Максимальные напряжения вдоль волокон в тройнике в зависимости от схемы армирования а) на нижней поверхности основной трубы б) на верхней поверхности основной трубы

На рис. 2.31 показаны графики зависимости напряжений от схемы армирования. В качестве основного критерия был принят предел прочности материала тройника для каждого из слоев. Расчеты позволяют определить рациональный угол армирования волокна с учетом концентратора напряжений. Для варианта без накладки с учетом напряжений на верхней и нижней

поверхности наиболее эффективна схема армирования 40-50°. Из графиков видно, что применение усиления позволяет значительно уменьшить напряжения в тройнике.

### 2.3. Конструкторско-технологическое проектирование тройников, изготовленных склеиванием стеклопластиковых труб

В МГТУ им. Н.Э.Баумана проводятся работы по изготовлению стеклопластиковых трубопроводов холодного водоснабжения. Применение стеклопластиковых соединительных элементов вызвано необходимостью увеличить срок службы трубопроводов. Сравнительно низкое давление позволяет упростить технологию изготовления, изготавливая тройники методом склеивания стеклопластиковых труб.

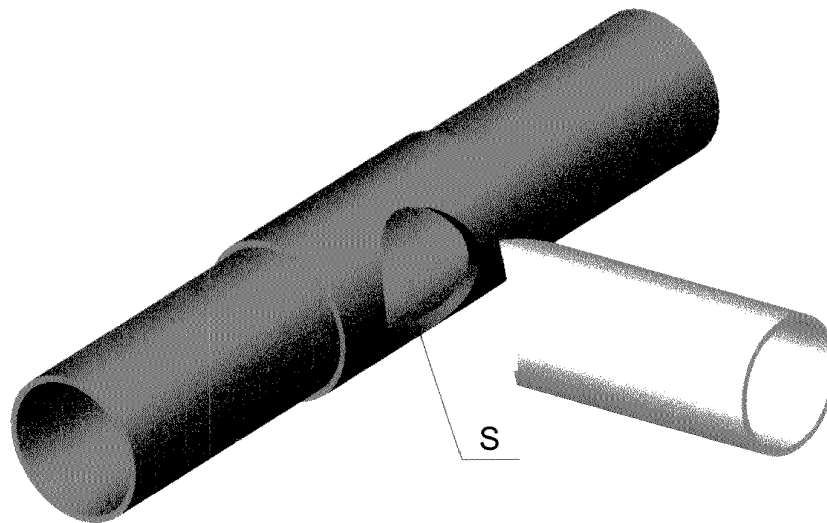


Рис. 2.32. Изготовление тройника методом склеивания

Тройник представляет собой комбинированную конструкцию, изготовленную из стеклопластиковых труб (Дн=90 мм, Двн.=80 мм) методом склеивания эпоксидным связующим на основе ЭДТ-10 с добавкой маршелита. Конструктивно схема изготовления представлена на рис.2.32.

Площадь склеиваемой поверхности  $S=3161\text{мм}^2$ .

Напряжения в стеклопластиковой оболочке у этого тройника значительно ниже предела прочности материала. Критичным местом является клеевое соединение трубопроводов.

Более точно распределение напряжений в зоне клеевого соединения

можно получить применением МКЭ. При этом необходимо использовать трехмерные конечные элементы. На рис. 2.33. показан пример расчета с использованием трансверсально изотропного материала  $E_{пр.}=25000\text{МПа}$ .

Давление  $p=5\text{МПа}$ .

Осевая сила в зоне законцовки от давления:

$$P = p \cdot \pi \cdot R^2 = 5\text{МПа} \cdot \pi \cdot (40\text{мм})^2 = 25130\text{Н} .$$

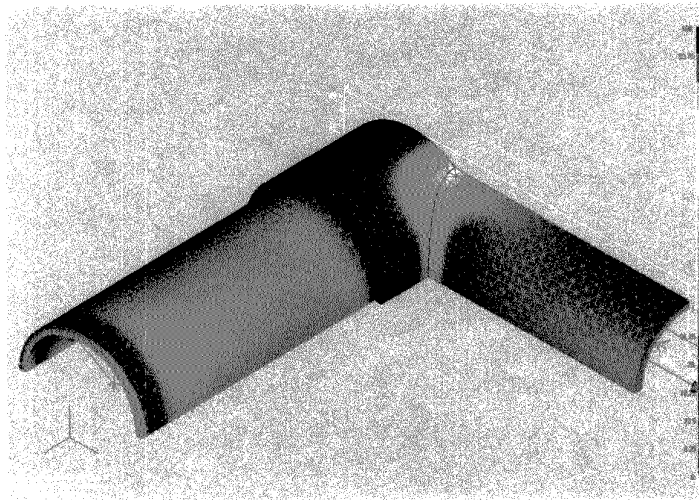


Рис.2.33. Расчет тройника с использованием объемных конечных элементов

Для уточнения распределения напряжений в зоне клеевого слоя можно создать КЭ модель с мелкой сеткой в зоне склеивания. Образец расчета показан на рис. 2.34.

Обзор существующих методов расчета клеевых соединений приведен в [53].

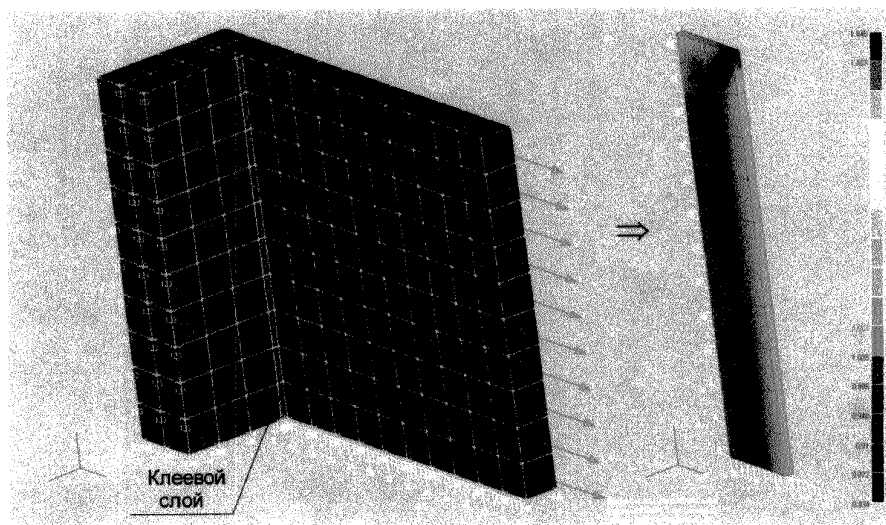


Рис.2.34. Расчет напряжений в зоне клеевого слоя

С целью проверки технических характеристик тройников были проведены испытания: прочности при пробном давлении (3МПа); герметичности при рабочем давлении (0,5МПа); фактического давления разрушения.

Анализ результатов испытаний показал: изделие типа "тройник" в части определения: прочности при пробном давлении, герметичности при рабочем давлении подвергалось всем перечисленным испытаниям и прошло эти испытания с положительным результатом. Фактическое давление разрушения – 47 кг/см<sup>2</sup>. Характер разрушения: потеря герметичности уплотнений в зоне законцовок.

#### **Выводы по главе 2:**

1. Проведенный анализ показал, что МКЭ с использованием программы MSC/Nastran позволяет проводить исследование напряженно-деформированного состояния для любого соотношения диаметров патрубка и основной трубы и заданных схем армирования. При этом конечно-элементный анализ обеспечивает большую точность и наглядность по сравнению с аналитическим решением.
2. Расчеты позволяют определить рациональный угол армирования волокна с учетом концентратора напряжений. МКЭ можно применять в проектных расчетах, так как оболочечные КЭ обеспечивают малое время счета и позволяют провести достаточное число итераций с изменением схемы армирования и толщины.
3. Расчеты НДС тройника из КМ показали, что применение усиления в зоне пересечения патрубка и основной трубы снижает уровень максимальных напряжений в тройнике. Наиболее эффективно применение накладки для случая, когда схема армирования определяется в первую очередь технологией изготовления.
4. Для композитного тройника, полученного методом склеивания стеклопластиковых патрубков, определить НДС в зоне клеевого соединения позволяет использование модели тройника из трехмерных конечных элементов.

## **ГЛАВА 3. МОДЕЛИ СОВМЕЩЕННОГО КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРОЙНИКА ИЗ КМ. РАЗРАБОТКА И ПОСТРОЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ И БАЗ ДАННЫХ**

### **3.1. Алгоритм и этапы синтеза конструкторско-технологических решений фасонных элементов трубопроводов из ПКМ**

Большое количество вариантов возможных альтернативных конструкций, технологий изготовления тройников, ограничений ТЗ, необходимость выбора оптимальных КТР обуславливает необходимость применения методов совмещенного конструкторско-технологического проектирования.

При разработке методики совмещённого конструкторско-технологического проектирования тройников была использована методология, разработанная в докторской диссертации Буланова И.М. [7].

Процесс совмещенного проектирования осуществляется на базе формирования совместных КТР. Совмещенное проектирование в соответствии с этой методологией состоит из четырёх этапов: 1. Концептуальное проектирование – декомпозиция объекта проектирования и технологии его изготовления на составные части – функциональные конструкторские элементы (ФКЭ) и функциональные технологические элементы (ФТЭ); 2. Структурное проектирование – синтез ФКЭ и ФТЭ для генерации множества вариантов КТР; 3. Параметрическая оптимизация – количественная оценка каждого КТР по выбранным критериям; 4. Выбор предпочтительных КТР – ранжирование вариантов и представление их лицу, принимающему решение.

В отличие от традиционных подходов методология совмещенного проектирования имеет следующие особенности:

- Конструкция и технология изготовления рассматриваются как система, состоящая из самостоятельных функциональных элементов;
- Декомпозиция системы выполняется на базе морфологического анализа как по элементам конструкции, так и по элементам технологии;



- Объединение элементов системы в целое осуществляется одновременно во времени на основе баз конструкторско-технологических данных и баз знаний;
- Генерация вариантов носит целенаправленный характер, позволяющая максимально уменьшать пространство допустимых решений, в частности, используя логико-лингвистические модели;
- Оценка КТР и их предпочтение определяется двумя обобщенными критериями (полезностью и платой за полезность), учитывающими как количественные, так и качественные параметры элементов синтеза.

Схема синтеза КТР, применительно к тройникам, показана на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Схема синтеза конструкторско-технологических решений тройника

Учитывая большое количество параметров, которые может варьировать разработчик, вероятно существование большого числа альтернативных КТР, удовлетворяющих требованиям технического задания, но различающихся по

выбранным критериям. Использование методологии совмещенного проектирования позволяет рассмотреть за одно и то же время значительно больше альтернативных вариантов КТР, чем при последовательном проектировании.

Композитный тройник трубопровода, в общем случае, может быть представлен в виде набора отдельных конструктивных элементов – герметизирующей оболочки, силовой и теплоизоляционной оболочек, и т.д., каждый из этих элементов выполняет свою определенную функцию, независимо от других (рис.3.2). Каждый элемент имеет большое число альтернативных конструкторских решений, которые характеризуются различными конструктивно-силовыми схемами (КСС) и используемыми материалами.

Каждый конструктивный элемент тройника можно изготавливать по различным технологиям, используя различные технологические методы формообразования, различное оборудование, оснастку, что, в конечном счёте, определяет качество конструкции, её трудоёмкость и технологическую себестоимость (см. рис.3.2). Синтез функциональных конструктивных (ФКЭ) и технологических элементов (ФТЭ) позволяет сформировать множество КТР. Такой функционально-структурный подход к разработке конструкций из ПКМ позволяет использовать для их проектирования метод морфологического анализа.

Морфологический метод основан на комбинаторике. Суть его состоит в следующем: в изделии выделяют группу основных функциональных конструктивных элементов; для каждого ФКЭ выбирают альтернативные варианты, т.е. возможные варианты его конструктивного исполнения и технологические реализации. Комбинируя их между собой, можно получить множество различных решений, в том числе известные и неизвестные варианты, а также варианты, в которых наряду с известными элементами имеются и новые. Это позволяет систематически выявлять всю совокупность возможных вариантов, анализировать последствия принимаемых решений и учитывать наличие нескольких целей, для достижения которых предназначается проектируемая система.

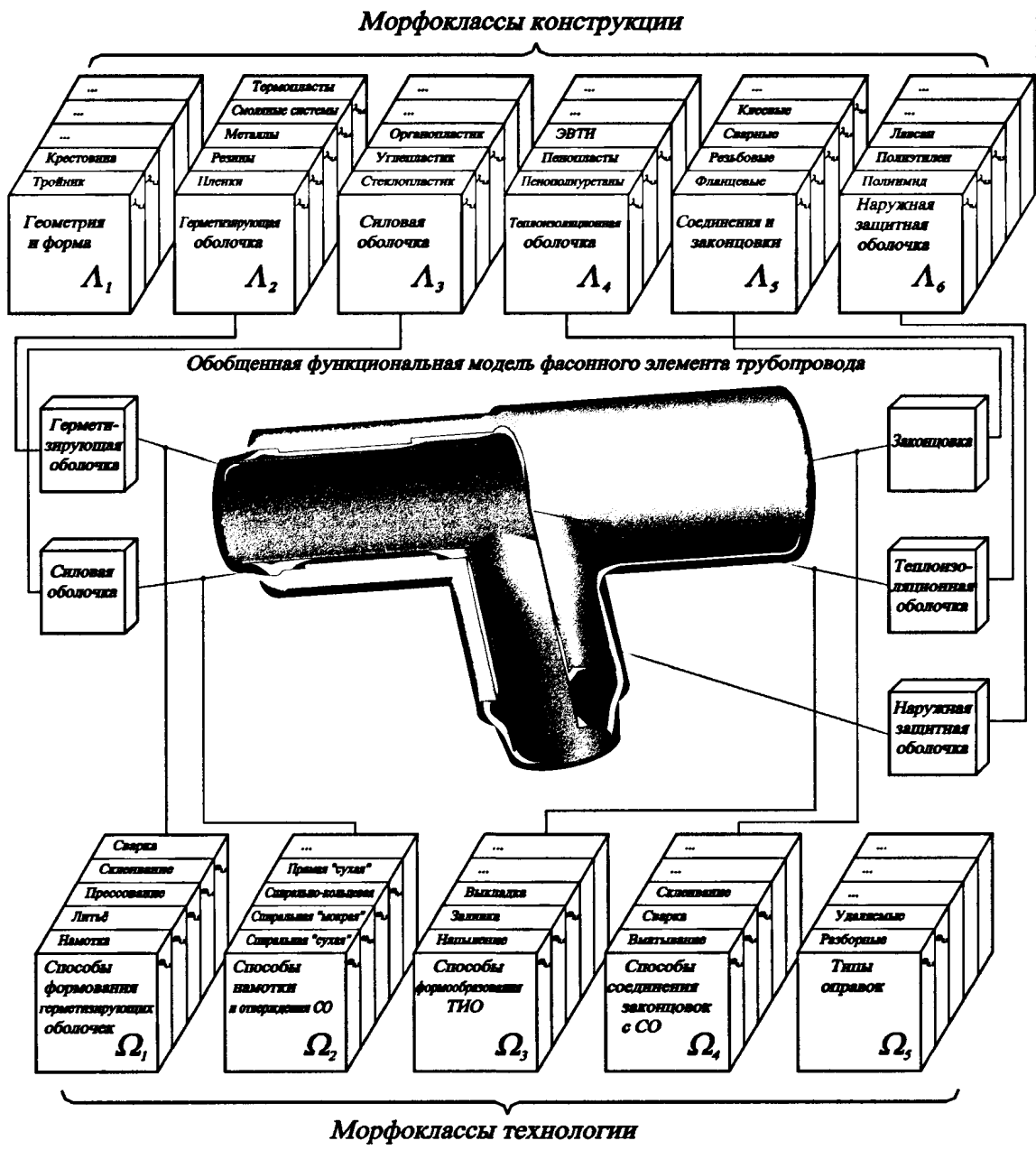


Рис.3.2. Морфология фасонного элемента трубопровода из ПКМ

Такой предварительный обобщенный анализ конструкции и технологии изготовления служит основой для совмещенного проектирования конкретного изделия, отвечающего требованиям технического задания (ТЗ).

Задача совмещенного проектирования состоит из ряда взаимосвязанных задач, таких, как декомпозиция системы на ее составные части, формирование морфологических блоков исходных данных, упорядочивание множества альтернативных вариантов фасонного элемента, организация процедуры отсеивания несовместимых вариантов, оценка КТР по функциям полезности и

платы за полезность.

Декомпозиция системы на составные части и формирование морфологических блоков исходных данных конструкции и технологии производится на основе анализа ТЗ в соответствии со схемой, приведенной на рис.3.2.

В общем случае примем, что выделено  $\Lambda_l, l = 1, \dots, L$  морфологических классов ФКЭ и  $\Omega_r, r = 1, \dots, R$  морфологических классов ФТЭ. Для нахождения морфологических классов, входящих в ту или иную КСС, необходимо построить морфологические блоки вариантов КСС  $\{MC\}_K$ .

Под морфологическим блоком КСС понимается таблица, в которой число столбцов соответствует числу схемных решений, а количество элементов в столбце - числу морфологических классов, входящих в данную КСС:

$$\{MC\}_K \rightarrow \left\{ \begin{array}{cccc} \Lambda_{1(1)} & \Lambda_{1(2)} & \dots & \Lambda_{1(i)} \\ \Lambda_{2(1)} & \Lambda_{2(2)} & \dots & \Lambda_{2(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Lambda_{L(1)} & \Lambda_{L(2)} & \dots & \Lambda_{L(i)} \end{array} \right\}, \quad (3.1)$$

где:  $\Lambda_{1(1)} \Lambda_{2(1)} \dots \Lambda_{L(1)}$  - морфологические классы, входящие в первую КСС;

$\Lambda_{1(2)} \Lambda_{2(2)} \dots \Lambda_{L(2)}$  - морфологические классы, входящие во вторую КСС;

$i$  - количество КСС, удовлетворяющих заданному классу трубопроводов.

Учитывая наличие взаимосвязи между ФКЭ и ФТЭ, морфологический блок  $\{MC\}_T$  можно построить, исходя из выделенных в  $\{MC\}_K$  морфологических классов при помощи матрицы связности  $\{Q\}_{\Lambda\Omega}$ , показывающей связь между морфологическими классами конструкции и технологии на уровне КСС. Эта матрица имеет вид

$$\{Q\}_{\Lambda\Omega} = \left\| \begin{array}{cccccc} \Omega_1 & \Omega_2 & \dots & \Omega_r & \dots & \Omega_R \\ 1 & 1 & \dots & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{array} \right\| \begin{array}{l} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \\ \dots \\ \Lambda_e \\ \dots \\ \Lambda_L \end{array}, \quad (3.2)$$

где единица соответствует тому, что данный морфологический класс ФТЭ связан с морфологическим классом конструкции, нуль - такая связь отсутствует. Таким образом, можно построить морфологический блок ФТЭ,

соответствующий каждой конструктивно-силовой схеме:

$$\{MC\}_T \rightarrow \left\{ \begin{array}{cccc} \Omega_{1(1)} & \Omega_{1(2)} & \dots & \Omega_{1(i)} \\ \Omega_{2(1)} & \Omega_{2(2)} & \dots & \Omega_{2(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Omega_{R(1)} & \Omega_{R(2)} & \dots & \Omega_{R(i)} \end{array} \right\}, \quad (3.3)$$

где:  $\Omega_{1(1)}, \Omega_{2(1)}, \dots, \Omega_{R(1)}$  - морфологические классы ФТЭ, связанные с реализацией первой КСС;  $\Omega_{1(2)}, \Omega_{2(2)}, \dots, \Omega_{R(2)}$  - морфологические классы ФТЭ, связанные с реализацией второй КСС.

При построении морфологических блоков  $\{MC\}_K$  и  $\{MC\}_T$  решается вопрос только о принципиальной схеме построения объекта, поскольку возможности технической реализации этого схемного решения не учитываются. Поэтому, прежде чем перейти к построению множества структурных вариантов конструкции и технологии, необходимо построить морфологические блоки элементов технической реализации  $\{MЭ\}_K$  и  $\{MЭ\}_T$ , под которыми понимаются таблицы, каждая строка которых соответствует определенному морфологическому классу, а размерность строки - числу возможных элементов, входящих в этот класс:

$$\{MЭ\}_K = \left\{ \begin{array}{cccccc} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \dots & \lambda_{1i} & \dots & \lambda_{1p(1)} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \dots & \lambda_{2i} & \dots & \lambda_{2p(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{r1} & \lambda_{r2} & \lambda_{r3} & \dots & \lambda_{ri} & \dots & \lambda_{rp(l)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{L1} & \lambda_{L2} & \lambda_{L3} & \dots & \lambda_{Li} & \dots & \lambda_{LP(L)} \end{array} \right\}, \quad (3.4)$$

где:  $\lambda_{li}$  -  $i$ -й альтернативный элемент  $l$ -го морфокласса конструкции;

$L$  - количество морфологических классов конструкции;

$P(l)$  - число элементов, относящихся к  $l$ -ому морфологическому классу.

Морфологический блок ФТЭ запишем в виде:

$$\{MЭ\}_T = \left\{ \begin{array}{cccccc} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \dots & \omega_{1j} & \dots & \omega_{1r(1)} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \dots & \omega_{2j} & \dots & \omega_{2r(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{r1} & \omega_{r2} & \omega_{r3} & \dots & \omega_{rj} & \dots & \omega_{rr(r)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{R1} & \omega_{R2} & \omega_{R3} & \dots & \omega_{Rj} & \dots & \omega_{Rr(R)} \end{array} \right\}, \quad (3.5)$$

где  $\omega_j$  -  $j$ -й альтернативный элемент,  $г$ -го морфологического класса технологии;  $R$  - количество морфологических классов ФТЭ;  $t(r)$  - число элементов, входящих в  $г$ -й морфологический класс.

Если морфологические блоки  $\{MC\}_K$  и  $\{MЭ\}_K$  реализуют взаимосвязь между КСС тройников и вариантами его структуры, то морфологические блоки  $\{MC\}_T$  и  $\{MЭ\}_T$  реализуют взаимосвязь между схемами технологического процесса изготовления трубопроводов и вариантами его структуры.

Для каждой строки морфологических блоков  $\{MЭ\}_K$  и  $\{MЭ\}_T$  могут быть составлены морфологические блоки исходных данных (рис.3.3), являющиеся основой для синтеза вариантов конструкции и технологического процесса.

$$\left[ \begin{array}{cccccc} \Lambda_1 & \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \cdots & \lambda_{1P_1} \\ A_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1P_1} \\ A_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2P_1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{g_1} & a_{g_1 1} & a_{g_1 2} & a_{g_1 3} & \cdots & a_{g_1 P_1} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{cccccc} \Lambda_2 & \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \cdots & \lambda_{2P_2} \\ B_1 & b_{11} & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{1P_2} \\ B_2 & b_{21} & b_{22} & b_{23} & \cdots & b_{2P_2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B_{g_2} & b_{g_2 1} & b_{g_2 2} & b_{g_2 3} & \cdots & b_{g_2 P_2} \end{array} \right]$$

Рис.3.3 Вид морфологических блоков исходных данных, где  $A_{g1}, B_{g2}$  - наименование параметров элементов морфокласса;  $a_{g1P_1}, b_{g1P_2}$  - количественное или качественное выражение параметров элементов морфоклассов

Имея разбиение множества всех элементов, которые могут войти в объект проектирования на морфологические классы, можно сформировать морфологические пространства элементов:

конструкции -  $\Lambda : \Lambda = \prod_{l=1}^L \Lambda_l$  ( $l=1, \dots, L$ ) и технологии -  $\Omega : \Omega = \prod_{r=1}^R \Omega_r$  ( $r=1, \dots, R$ ).

На основании соотношений (3.1) и (3.2) можно сгруппировать блоки исходных данных для каждой КСС. При этом образуются подпространства морфологического пространства элементов конструкции, в которых каждый конструкторский вариант образуется пересечением с каждым морфологическим классом:  $\bar{x} \in \Lambda, \bar{x} = \bar{x}(\lambda_{1i(1)}, \lambda_{2i(2)}, \dots, \lambda_{ii(i)}, \dots, \lambda_{Li(L)}), \bar{x} \cap \Lambda_l = \sigma^{-1}$ , (3.6)

где  $\sigma^{-1}$  - одноэлементное множество.

На основании выражений (3.2) и (3.5) можно сгруппировать блоки исходных данных для каждой схемы технологического процесса. При этом образуются подпространства морфологического пространства технологических методов  $\Omega$ , в которых любой вариант технологического процесса образуется пересечением с каждым морфологическим классом:

$$\bar{y} \in \Omega, \bar{y} = \bar{y}(\omega_{1j(1)}, \omega_{2j(2)}, \dots, \omega_{rj(r)}, \dots, \omega_{Rj(R)}), \bar{y} \cap \Omega_r = \sigma^{-1}. \quad (3.7)$$

Таким образом, в результате морфологического анализа формируются группы блоков исходных данных морфологически однородных элементов конструкции и технологии, из которых можно синтезировать конструкторские и технологические варианты для каждого схемного решения.

При решении задачи синтеза вариантов КТР желательно синтезировать только такие варианты, которые удовлетворяют параметрам ТЗ, а ФКЭ в синтезированных вариантах совместимы по физическим и конструктивным признакам между собой. Это позволяет не только снизить размерность задачи синтеза, но и, что более существенно, сократить время совмещенного проектирования на ЭВМ.

В задачах, где необходимо сформировать множество вариантов, оценки которых по ряду параметров не могут превышать некоторой, заранее заданной величины, достаточно эффективно можно применять модификацию лексикографического морфологического метода - метод последовательных уступок. Морфологический принцип этого метода заключается в том, что формируются варианты объекта, содержащие ровно по одному элементу от каждого морфологического класса. Лексикографический принцип состоит в том, что очередной  $i$  и  $j$  элементы, включенные в состав варианта объекта проектирования, лексикографически предпочтительнее всех элементов, оставшихся к этому моменту в морфологических классах, из которых ранее в формируемый вариант не вошел ни один элемент.

При выделении вариантов методом последовательных уступок допустимыми являются варианты со значением параметров, не превышающими допустимого отклонения ("уступки"), в нашем случае - это ограничение, наложенное ТЗ:

$$\begin{aligned}
 a_2(\lambda_{ii(t)}) &\leq a_2^* \\
 a_3(\lambda_{ii(t)}) &\leq a_3^* \\
 \dots &\dots \\
 a_k(\lambda_{ii(t)}) &\leq a_k^* \\
 \dots &\dots \\
 M(\bar{x}_i) &\leq M^*
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

где  $a_2, a_3, \dots, a_k$  - значения параметров альтернативных элементов морфоклассов конструкции;  $a_2^*, a_3^*, \dots, a_k^*, \dots, M^*$  - ограничения ТЗ на показатели конструкции;  $M(\bar{x}_i)$  - масса варианта конструкции.

Таким образом, синтез конструкторских решений, удовлетворяющих ограничениям ТЗ, проводится в два этапа. Сначала отсеиваются альтернативные элементы морфоклассов конструкции, удовлетворяющие ограничениям, предъявляемым к параметрам этих элементов, а затем проводится синтез вариантов конструкций с массой, меньшей или равной, оговоренной в ТЗ.

Чтобы выделить альтернативные элементы конструкции, из которых можно получить варианты, удовлетворяющие всем ограничениям, кроме массового, достаточно проверить на соответствие этим ограничениям параметров элементов конструкции. Для этого надо сопоставить значения соответствующих параметров элемента из морфологического класса значениям рассматриваемых ограничений ТЗ в диагональных матрицах. Например,

$$[E_{\lambda_{ii(t)}}] = \begin{vmatrix} a_2^* & a_3^* & \dots & a_k^* \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_2(\lambda_{ii(t)}) \\ a_3(\lambda_{ii(t)}) \\ \dots \\ a_k(\lambda_{ii(t)}) \end{vmatrix}
 \tag{3.9}$$

Если  $|E_{(i,i(t))}| = 1$ , то элемент в дальнейшем может рассматриваться как альтернативный, если  $|E_{(i,i(t))}| = 0$ , элемент из задачи синтеза исключается.

Проводится упорядочение оставшихся в морфологических блоках элементов в порядке возрастания параметров  $a_1, b_1, \dots$ , входящих в оценочную формулу массы фасонного элемента – тройника.

Минимальная масса тройника по условиям ТЗ, - это критерий выбора КТР



и её определяют через массу равнонапряжённой оболочки вращения:

$$M_{\min} = 3P_p \cdot V \cdot \rho_k / \sigma_1^+, \quad (3.10)$$

где  $M_{\min}$  - масса равнонапряженной композитной оболочки вращения,  $P_p$  - разрушающее давление;  $\sigma_1^+$  - предел прочности однонаправленного КМ при растяжении;  $\rho_k$  - плотность композита;  $V$  - внутренний объем тройника.

Параметры элементов морфоклассов, входящие в формулу расчета массы:

$\Lambda_1$  - "Геометрия и форма":  $a_1 - D_1$ , - условный проходной диаметр патрубка, мм;  $a_2 - D_2$  - условный проходной диаметр основной трубы, мм;  $a_3 - L_1$  - длина основной трубы, мм;  $a_4 - L_2$  - длина патрубка, мм;

Параметры морфокласса  $\Lambda_1$  заданы в конструкторской документации и постоянны для всех вариантов.

$\Lambda_2$  - "Герметизирующая оболочка из металлов и неметаллов":  $b_2 - \rho$  - плотность материала герметизирующей оболочки, кг/м<sup>3</sup>;  $b_3 - \sigma_1^+$  - предел прочности при растяжении материала, МПа;

$\Lambda_3$  - "Силовая оболочка":  $c_1 - \rho$  - плотность материала силовой оболочки, кг/м<sup>3</sup>;  $c_2 - \sigma_1^+$  - предел прочности композита при растяжении в направлении армирования, МПа;

Для тройника минимальной массы элементы  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  должны иметь минимальные значения. Поскольку в формулу расчета минимальной массы входят только два переменных параметра  $\rho$  и  $\sigma_1^+$  то можно провести полный перебор всех вариантов конструкции, которые удовлетворяют ограничениям по массе.

Последовательность операций синтеза технологических решений (ТР) строится в соответствии со схемой, приведённой на рис.3.4.

Подсистема синтеза КТР содержит базу данных детерминированных технологических решений. На основе поступающей из подсистемы формирования конструкторских решений (КР) тройников информации проводится выделение соответствующих технологических решений, которые будут участвовать в формировании КТР. Возможность применения того или иного элемента технологии для данного варианта конструкции определяется технологическими особенностями

переработки используемых материалов и характеристиками рассматриваемого КР. Большинство этих характеристик, за исключением оговоренных в ТЗ, определяются в результате синтеза вариантов конструкции и последующих расчетов.

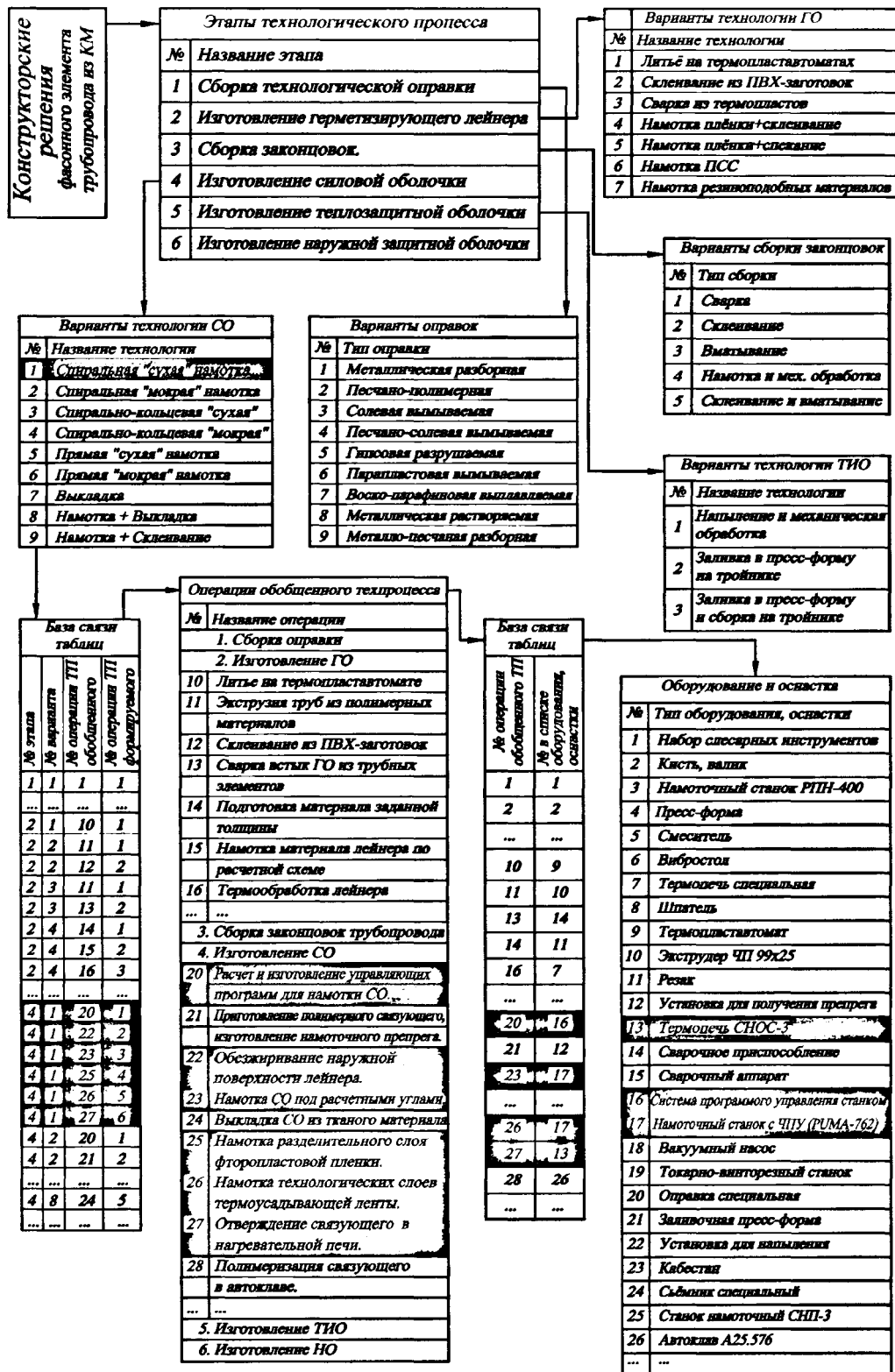


Рис.3.4. Фрагмент подсистемы синтеза технологических процессов

Каждое КР должно быть проверено по технологическим ограничениям. Для этой цели подсистема синтеза КТР содержит базы данных имеющегося на предприятии оборудования и оснастки, позволяющих эти решения реализовать. Как и в случае конструкторских баз данных, базы данных оборудования и оснастки содержат как количественную информацию (технико-экономические показатели), так и качественную, такую, например, как характеристику экологической безопасности данного технологического процесса, которая в дальнейшем также используется для сравнения сформированных КТР.

Таким образом, на основе предельно возможных или рациональных показателей, содержащихся в базах данных технологического оборудования и оснастки, проводится проверка синтезированных конструкторских решений по технологическим ограничениям, т.е. проверка на возможность их физической реализации в рамках данного предприятия.

Синтез КТР композитных тройников трубопроводов осуществляется путем сопоставления допущенных к синтезу КР и соответствующих им технологических решений (ТР). В результате синтеза технологических процессов завершается формирование альтернативных КТР тройников. В результате применения данного алгоритма формируется полное множество допустимых вариантов КТР, на котором решается задача выбора наиболее эффективного КТР по заданной системе критериев.

### 3.2. Выбор предпочтительных вариантов с использованием функций полезности и платы за полезность

В процессах проектирования технических систем функция полезности является функцией многих частных критериев как количественных, так и качественных. Математическая модель функции полезности в общем виде:

$$U_j = [U^*_j(\vec{\lambda})] \times \frac{\prod_{i=1}^m \mu_i^U(\lambda_i, \omega_r)}{\prod_{q=1}^r \mu_q^U(\lambda_i, \omega_r)}, \quad (3.11)$$

где  $U^*_j(\vec{\lambda})$  - оптимальное значение основного количественного показателя полезности  $j$ -го варианта;  $\vec{\lambda}$  - вектор параметров совмещенного

проектирования КТР;  $\mu_i^U(\lambda_i, \omega_r), \mu_q^U(\lambda_i, \omega_r)$ - функции принадлежности неметрических показателей элементов морфоклассов  $\lambda$  и  $\omega$ , влияющие на основной количественный показатель;  $m$  - количество неметрических показателей (критериев), уменьшающее величину основного количественного показателя полезности;  $t$  - количество неметрических показателей (критериев), увеличивающее величину основного количественного показателя полезности.

Ожидаемую функцию платы за полезность, или второй обобщенный критерий, записывается для общего случая в виде:

$$P_j = [P^*_{j,}(\vec{t})] \times \frac{\prod_{i=1}^m \mu_i(P_{k,i})}{\prod_{j=1}^p \mu_j(P_{k,j})}, \quad (3.12)$$

где  $P^*_{j,}(\vec{t})$  - значение основного экономического показателя  $j$ -го варианта;  $\vec{t}$  - вектор параметров КТР, определяющий основной экономический показатель;  $\mu_i^P(\lambda_i, \omega_r), \mu_q^P(\lambda_i, \omega_r)$ - функции принадлежности неметрических показателей, влияющие на основной экономический показатель;  $m$  - количество неметрических показателей (критериев), уменьшающее величину основного количественного показателя полезности;  $p$  - количество неметрических показателей (критериев), увеличивающее величину основного количественного показателя полезности.

Для оценки КТР в качестве основного показателя полезности можно выбрать следующий критерий:

$$U^*_{j,}(\vec{k}) = \frac{k_{без} \cdot P_{раб} \cdot V}{M_{\Sigma}} = U(a_{k,i,j}, b_{i,k,i}), \quad (3.13)$$

где  $k_{без}$  - коэффициент безопасности, заданный в ТЗ;  $P_{раб}$  - рабочее давление трубопровода, заданное в ТЗ;  $V$  - объем фасонного элемента;  $M_{\Sigma}$  - масса;  $a_{k,i,j}, b_{i,k,i}$  - параметры элементов морфоклассов  $\Lambda$  и  $\Omega$ , используемые в конструкторско-технологическом решении.

Максимальное значение целевой функции  $\left( \frac{k_{без} \cdot P_{раб} \cdot V}{M_{\Sigma}} \right)^{\max}$  является

результатом решения оптимизационной задачи совмещенного проектирования.

Функция полезности включает в себя помимо основного количественного критерия ряд качественных параметров, которые можно выразить как функции нечетких множеств  $\mu_i^U(k_i, t_r)$  и  $\mu_q^U(k_i, t_r)$ . Алгоритм преобразования качественных частных критериев в количественные значения функций принадлежности связан с использованием экспертных оценок квалифицированных специалистов и логистических функций [7, 54-55].

Значения качественных показателей в функциях полезности и платы за полезность учитывают только на последнем этапе, когда выбирают ряд приоритетных КТР.

С помощью экспертов разработчик должен выделить из группы частных неметрических критериев те, которые увеличивают величину основного количественного показателя функции полезности ( $\mu_i^U(k_i, t_r)$ ) и те, которые уменьшают его величину ( $\mu_q^U(k_i, t_r)$ ).

Для получения достоверных оценок качественных критериев необходимо корректно и правильно сформулировать вопросы экспертам. Каждый качественный критерий имеет свое определение. Например, при разработке фасонных элементов композитных трубопроводов качественными критериями могут быть: 1. уровень совместимости материалов оболочки с материалом законцовки (УСМЗ); 2. уровень влияния текстильной структуры наполнителя на разрушающее давление (УВСВ); 3. уровень влияния стабильности физико-механических свойств материалов на разрушающее давление и массу (УВСС); 4. уровень влияния конструкции законцовки на надежность соединения (УВМС); 5. уровень влияния выбранной технологии на разрушающее давление (УВ/Р).

Все частные неметрические критерии являются параметрами элементов морфоклассов  $\Lambda$  и  $\Omega$  и находятся в соответствующих базах данных.

Ответы экспертов, преобразованные в количественные значения функций принадлежности, могут быть занесены в базы данных как неизменяемые, инвариантные характеристики качественных критериев, и в других аналогичных задачах их определение не требует привлечения экспертов.

Рассчитанное таким образом значение полезности учитывает как количественные показатели, полученные в результате прочностных, тепловых, точностных и других расчетов, так и качественные показатели, которые можно оценить только экспертно.

Полученные исходы необходимо проранжировать по максимальному значению функций полезности:  $U_1 \succ U_2 \succ \dots \succ U_n$ .

Функция платы за полезность  $P$  выражает экономическую оценку каждого варианта, но не является синонимом стоимости, как экономической категории в силу наличия субъективных или неметрических оценок.

Наиболее универсальным упрощенным количественным выражением платы за полезность на ранних стадиях разработки для конструкций летательных аппаратов является удельная технологическая себестоимость:

$$[P^*_{j}(\bar{t})] = \frac{C_{\text{тех.}}}{M_{\Sigma}} = \frac{C_{\text{м}} + C_{\text{з}} + C_{\text{э}}}{M_{\Sigma}}. \quad (3.14)$$

где  $M_{\Sigma}$  - суммарная масса фасонного элемента;  $C_{\text{м}}$  - стоимость материалов, применяемых в данном конструкторско-технологическом решении;  $C_{\text{з}}$  - заработная плата основных и вспомогательных рабочих (с отчислениями), приходящаяся на 1 изделие;  $C_{\text{э}}$  - затраты на эксплуатацию технологического оснащения и оборудования;  $a_{\lambda, j}, b_{\omega, m}$  - параметры элементов морфоклассов  $\Lambda$  и  $\Omega$ , используемых при расчете.

Полнота и достоверность функции платы за полезность может быть достигнута за счет учета влияния неметрических частных критериев  $(\mu_i^p(k_i, t_r))$  и  $(\mu_q^p(k_i, t_r))$ , которые соответственно уменьшают или увеличивают значение функции. Эти неметрические критерии в основном должны выражать влияние технологии изготовления конструкции.

Функция платы за полезность, так же как и функция полезности, не имеет строгого физического смысла. Она выражает сравнительную оценку альтернативных вариантов и предназначена для их сопоставления и ранжирования по абсолютному значению функции в порядке возрастания:  $P_1 \succ P_2 \succ \dots \succ P_n$ .

Для получения возможности наглядной графической иллюстрации расчетные значения функций полезности и платы за полезность наносят на поле проектных альтернатив, показанное на рис.3.3.

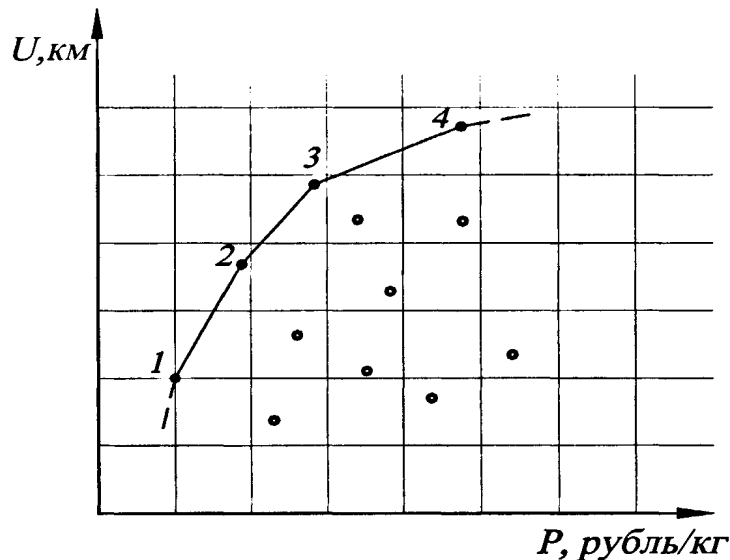


Рис.3.5. Поле проектных альтернатив

Дальнейший анализ пар чисел, характеризующих альтернативы, проводится на координатной сетке U-P, где каждая альтернатива представлена изображающей точкой. Абсцисса изображающей точки равна плате за полезность, а ордината - полезности данной альтернативы. На этом поле проектных альтернатив и происходит окончательный выбор предпочтительных альтернативных КТР тройников трубопроводов. На практике осуществляется поиск Парето-оптимальных решений (точки 1,2,3,4 на рис. 3.3.) и выбор из них вариантов, подлежащих разработке [7,56-58]. Выбору технических решений посвящены работы многих авторов [59-65].

### 3.3. Разработка и построение морфологических блоков и баз данных конструкции

#### Морфокласс $\Lambda_1$ - "Геометрия и форма".

Блоки исходных данных морфокласса  $\Lambda_1$  строятся на основе списка требований ТЗ, технических условий на разработку и геометрического чертежа трубопровода, сформированного в концептуальном решателе, в которых отражены геометрические размеры, форма трубопроводов, тип соединений участков трубопроводов между собой и с отдельными агрегатами.

Можно выделить следующие элементы морфокласса  $\Lambda_i$ :

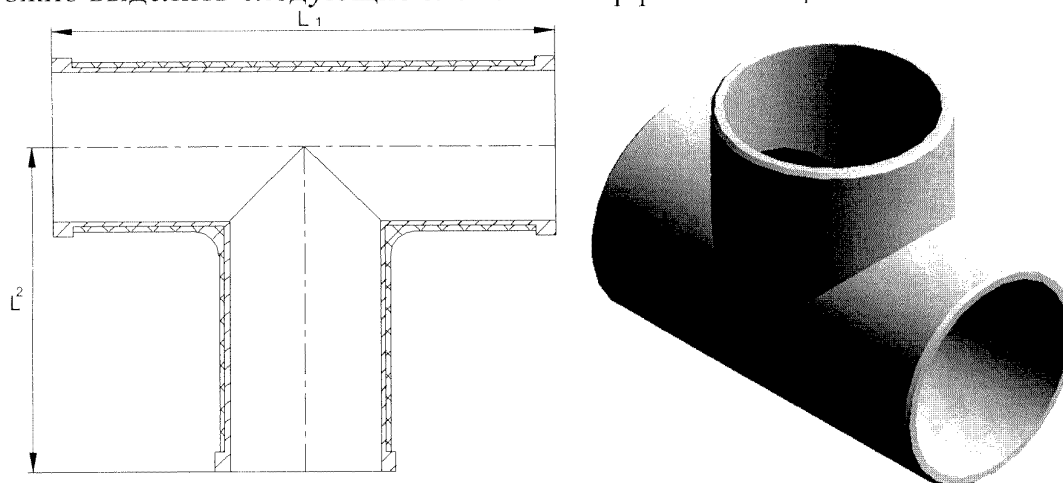


Рис. 3.6. Элемент морфокласса  $\lambda_{1,1}$  – тройник

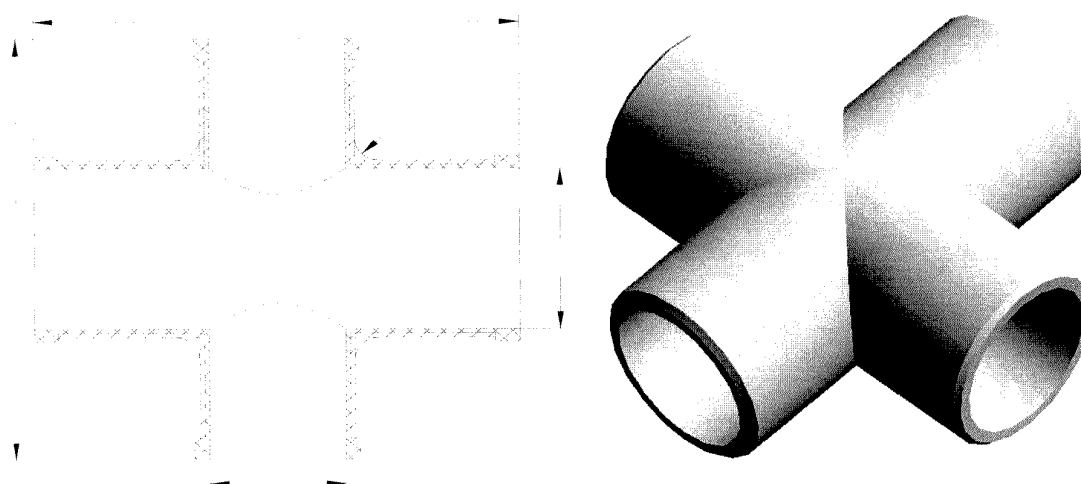


Рис. 3.7. Элемент морфокласса  $\lambda_{1,2}$ -крестовина

Параметрами элементов морфокласса  $\Lambda_i$ , которые вводятся в компьютерную базу данных, являются:

- $a_1 - D_1$ , - условный проходной диаметр патрубка, мм;
- $a_2 - D_2$  - условный проходной диаметр основной трубы, мм;
- $a_3 - L_1$  - длина основной трубы, мм (см. рис.3.4.);
- $a_4 - L_2$  - длина патрубка, мм (см рис.3.4.);
- $a_5 - D_H$  - предельный наружный диаметр, мм;
- $a_6 - TC$  - тип соединения: P(разъемное), НР(неразъемное);
- $a_7 - \Delta_m$  - монтажное перемещение от стыка до стыка, мм;
- $a_8 - \Delta_э$  - эксплуатационные перемещения от стыка до стыка, мм;



## Морфокласс $\Lambda_2$ - "Герметизирующая оболочка из металлов и неметаллов"

В качестве материалов гермослоя могут применяться: 1- металлы, 2- резины, 3- термопласты, 4- пленки, 5- полимерные смоляные системы.

Анализ применяемых материалов в качестве гермослоя [66-81] позволяет выделить следующие элементы морфокласса  $\Lambda_2$ :

$\lambda_{2,1}$  - нержавеющая сталь 12Х18Н10Т;

$\lambda_{2,2}$  - алюминиевый сплав 1201;

$\lambda_{2,3}$  - титановый сплав ВТ5-1;

$\lambda_{2,4}$  - резина силиконо-каучуковая ИРП-1310;

$\lambda_{2,5}$  - резина фтор-каучуковая ФК-0.45;

$\lambda_{2,6}$  - полиэтилен высокого давления;

$\lambda_{2,7}$  - полиэтилен низкого давления;

$\lambda_{2,8}$  - полиамид литьевой 610;

$\lambda_{2,9}$  - пленка полиэтилентерефталатная (лавсановая);

$\lambda_{2,10}$  - пленка полиимидная ПМФ-352;

$\lambda_{2,11}$  - пленка полиимидная металлизированная ПИ-М;

$\lambda_{2,12}$  - пленка полиуретановая термопластичная ВИТУР Т-2213-85;

$\lambda_{2,13}$  - пленка полиуретановая термопластичная ВИТУР Т-0433-85;

$\lambda_{2,14}$  - полимерная смоляная система ПСС-1 на основе нетканых материалов;

$\lambda_{2,15}$  - полимерная смоляная система ПСС-2 на основе тканых материалов;

$\lambda_{2,16}$  - полимерная смоляная система ПСС-3 комбинированная;

$\lambda_{2,17}$  - литьевой стеклонаполненный полиалканимид ПАИ-С-ЭК-3;

$\lambda_{2,18}$  - литьевой стеклонаполненный полисульфон ПС-КС.

Для рассматриваемых элементов морфокласса  $\lambda_2$  в базы данных заносятся следующие параметры, необходимые для выбора материала герметизирующей оболочки, расчета ее несущей способности и герметичности, оценки технологических возможностей материала:

$b_1$ -УХС - уровень хемостойкости материала в рабочем теле (качественный параметр);

- $b_2$  -  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;
- $b_3$  -  $\sigma_1^+$  - предел прочности при растяжении, МПа;
- $b_4$  -  $\sigma_T$  - предел текучести, МПа;
- $b_5$  -  $E_1^+$  - модуль упругости при растяжении, ГПа;
- $b_6$  -  $\nu$  - коэффициент Пуассона;
- $b_7$  -  $\delta$  - относительное удлинение при растяжении, %;
- $b_8$  -  $\alpha$  - коэффициент линейного термического расширения, К<sup>-1</sup>;
- $b_9$  -  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;
- $b_{10}$  -  $P$  - проницаемость по рабочему телу, см<sup>2</sup>/с·МПа;
- $b_{11}$  -  $D$  - коэффициент диффузии;
- $b_{12}$  -  $T_{\max}$  - максимальная температура термообработки материала, К;
- $b_{13}$  -  $T_{\min}^{\max}$  - диапазон температур эксплуатации, К;
- $b_{14}$  - УВО - уровень влияния огнестойкости материала на пожарную безопасность (качественный параметр);
- $b_{15}$  - УВАГ - уровень влияния адсорбции газов в гермослое на интенсивность его разрушения (качественный параметр);
- $b_{16}$  - ТВМП - технологические возможности материала при переработке (качественный параметр);
- $b_{17}$  - УВВП - уровень влияния характеристик материала на экологическую безопасность и вредность в производстве (качественный параметр);
- $b_{18}$  - УСМЗ - уровень совместимости материала лайнера с материалом законцовки (качественный параметр);
- $b_{19}$  - Смат - стоимость материала, руб/кг.

### **Морфокласс $\Lambda_3$ – “Силовая оболочка”**

Анализ применяемых материалов [82-92] позволил включить в морфокласс  $\Lambda_3$  следующие элементы:

- $\lambda_{3,1}$  - стеклопластик однонаправленный жгутовой РВМП-10-1600-ЭДМ;
- $\lambda_{3,2}$  - стеклопластик однонаправленный нитяной ВМПС-6-ЭДТ-10;
- $\lambda_{3,3}$  - стеклопластик однонаправленный жгутовой РВМН-10-1200-ЭХД;
- $\lambda_{3,4}$  - углепластик однонаправленный жгутовой УКН-П/5000-ЭДТ-10;
- $\lambda_{3,5}$  - углепластик ленточный однонаправленный ЭЛУР-М-ЭХД;

$\lambda_{3,6}$  - углепластик однонаправленный нитяной ВМН-4-ЭДТ-10;

$\lambda_{3,7}$  - органопластик однонаправленный нитяной СВМ-29.4-ЭДТ-10;

$\lambda_{3,8}$  - органопластик однонаправленный жгутовой Армос-2-100-6А-ЭХД;

$\lambda_{3,9}$  - органопластик однонаправленный жгутовой ЖСВМ-5-ЭДТ-10.

Модели прочностного и теплопрочностного расчетов фасонных элементов трубопроводов, а также модель выбора материала силовой оболочки включает ряд параметров, которые должны содержаться в базе данных морфокласса  $\Lambda_3$ .

К этим параметрам относятся:

$c_1$  -  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$c_2$  -  $\sigma_1^+$  - предел прочности при растяжении в направлении армирования, МПа;

$c_3$  -  $\sigma_2^+$  - предел прочности при растяжении поперек армирования, МПа;

$c_4$  -  $E_1^+$  - модуль упругости при растяжении в направлении армирования, ГПа;

$c_5$  -  $E_2^+$  - модуль упругости при растяжении поперек армирования, ГПа;

$c_6$  -  $\tau_{12}$  - предел прочности при сдвиге, МПа;

$c_7$  -  $G_{12}$  - модуль сдвига, МПа;

$c_8$  -  $\nu_{12}$  - коэффициент Пуассона;

$c_9$  -  $\delta$  - относительное удлинение при разрыве, %;

$c_{10}$  -  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

$c_{11}$  -  $\alpha$  - коэффициент линейного термического расширения вдоль волокон, К<sup>-1</sup>;

$c_{12}$  -  $T$  - линейная плотность армирующего материала, текс;

$c_{13}$  -  $\sigma_{мп}^+$  - предел прочности микропластика при растяжении, МПа;

$c_{14}$  -  $T_{мин}^{max}$  - диапазон температура эксплуатации материала, К;

$c_{15}$  -  $T_{max}$  - максимальная температура термообработки, К;

$c_{16}$  - УХС - уровень хемостойкости материала в рабочем теле и окружающей среде (качественный параметр);

$c_{17}$  - УВСВ - уровень влияния текстильной структуры и вида армирующего наполнителя (линейная плотность, крутка, неоднородность) на снижение коэффициента реализации прочности волокна (качественный параметр);

$c_{18}$  - УВСС - уровень влияния стабильности механических свойств армирующего наполнителя на вероятность снижения прочностных свойств материала в конструкции (качественный параметр);

- $c_{19}$  - УВВП - уровень влияния материала на экологическую безопасность и вредность в производстве (качественный параметр);
- $c_{20}$  - УВО - уровень влияния огнестойкости на пожарную безопасность (качественный параметр);
- $c_{21}$  - УСМЗ - уровень совместимости материала силовой оболочки с материалом законцовки (качественный параметр);
- $c_{22}$  -  $C_{\text{мат}}$  - стоимость одного килограмма материала, руб/кг.

В базах данных, там, где это не оговорено, параметры элементов морфокласса  $\Lambda_3$  относятся к однонаправленным материалам.

#### **Морфокласс $\Lambda_4$ - "Теплоизоляционная оболочка"**

Теплоизоляция, как элемент конструкции фасонного элемента трубопровода должна обладать прежде всего низким коэффициентом теплопроводности, малой плотностью, достаточной механической прочностью, стабильностью к тепловому удару (при заправке топлива), адгезией по отношению к материалам силовой оболочки, удовлетворительными технологическими свойствами, негорючестью и нетоксичностью в условиях эксплуатации.

Морфоблок  $\Lambda_4$  сформирован только для совмещенного проектирования криогенных топливопроводов, поскольку условия эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов, оговоренные в ТЗ, не требуют применения теплоизоляции.

В качестве теплоизоляции криогенных трубопроводов топливных систем самолетов и других ЛА могут быть выбраны пенопласты на основе изоцианатов и пенопласты полиуретановые на основе изоциануратов.

Выбор материала для теплоизоляции криогенных трубопроводов представляет собой достаточно непростую в научном отношении задачу. Известно большое количество марок пенопластов [20-23], которые потенциально можно использовать для теплоизоляционных оболочек трубопроводов.

Основными параметрами теплоизоляционных материалов для расчета конструкции являются плотность и теплопроводность при стационарных процессах. В быстротечных нестационарных процессах наряду с плотностью и теплопроводностью важное значение также имеют удельная теплоемкость и

температуропроводность. Для теплоизоляционных оболочек трубопроводов летательных аппаратов выгоднее иметь более легкие материалы с малой теплопроводностью. Следует учитывать также, что с понижением температуры теплопроводность пенополиуретанов значительно уменьшается.

В морфокласс  $\Lambda_4$  входят следующие теплоизоляционные материалы:

$\lambda_{4,1}$  - пенополиуретан напыляемый, жесткий ППУ-308Н;

$\lambda_{4,2}$  - пенополиуретан напыляемый, жесткий ППУ-17Н;

$\lambda_{4,3}$  - пенополиуретан заливочный ППУ-И1;

$\lambda_{4,4}$  - пенопласт полиуретановый на основе изоцианатов, напыляемый, Изолан-8;

$\lambda_{4,5}$  - пенопласт на основе полиизоцианата, заливочный, Виласт-1;

$\lambda_{4,6}$  - пенопласт на основе полиизоцианата, заливочный, Викорт-1М;

$\lambda_{4,7}$  - экранно-вакуумная теплоизоляция ЭВТИ.

Таблица 9

Параметры элементов морфокласса  $\Lambda_4$  (фрагмент)

Параметры		Размерность	Элементы морфокласса			Окружающая среда	Источник информации
Код	Обозн.		$\lambda_{42}$	$\lambda_{43}$	$\lambda_{45}$		
d <sub>1</sub>	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	40.. 70	65.. 90	20...30	Нормальные условия атмосферы	СБД
d <sub>2</sub>	$\lambda$	Вт/м×К	0.035	0.042	0.040		
d <sub>3</sub>	$\bar{c}$	Дж/кг×К	(-)	(-)	(-)		
d <sub>4</sub>	$\alpha$	К <sup>-1</sup>	$70 \times 10^{-6}$	$60 \times 10^{-6}$	$55 \times 10^{-6}$		
d <sub>5</sub>	$T_{\min}^{\max}$	К	77.. 393	77.. 523	93... 445		
d <sub>6</sub>	$\sigma_1^+$	МПа	0.35	0.28	0.06		
d <sub>7</sub>	$\sigma_1^-$	МПа	0.20	0.11	0.05		
d <sub>8</sub>	$E_1^+$	МПа	7.5	12.0	-		
d <sub>9</sub>	$E_1^-$	МПа	24.0	35.0	-		
d <sub>10</sub>	$\nu$	—	0.40	0.42	0.40		
d <sub>11</sub>	$\Delta$	%	0.50	0.45	0.40		
d <sub>12</sub>	$T_{\max}$	К	(-)	353	413		
d <sub>13</sub>	$\delta$	%	(-)	10.0	8.0		
d <sub>14</sub>	СОС	Кач.	Низкий	Низкий	Оч.низкий	ЭО	
d <sub>15</sub>	УВВП	Кач.	Средний	Оч.низкий	Низкий		
d <sub>16</sub>	ТВМП	Кач.	Высокий	Средний	Средний		

Возможно применение комбинированной двухслойной теплоизоляции, в которой первый слой состоит, как правило, из мягких губчатых пенопластов, а

второй слой - из жестких пенопластов с замкнутыми ячейками. Такой способ формообразования теплоизоляционной оболочки увеличивает сопротивление изоляции к тепловым ударам, предотвращает образование трещин и обеспечивает равномерную плотность тепловой изоляции. Возможна оценка использования двухслойных комбинированных оболочек, например, в сочетании материалов Виласт-1 ( $\lambda_{4,5}$ ) и Викорт-1М ( $\lambda_{4,6}$ ).

В таблице 9 приведен фрагмент конструкторской базы данных для морфокласса  $\Lambda_4$ . В качестве параметров элементов морфокласса  $\Lambda_4$ , необходимых для выбора материала теплоизоляционной оболочки и теплопрочностного расчета, приняты следующие показатели:

$d_1$  -  $\rho$  - кажущаяся плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$d_2$  -  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

$d_3$  -  $\bar{c}$  - удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

$d_4$  -  $\alpha$  - коэффициент линейного термического расширения, К<sup>-1</sup>;

$d_5$  -  $T_{\min}^{\max}$  - рабочий диапазон температур, К;

$d_6$  -  $\sigma_1^+$  - разрушающее напряжение при растяжении, МПа;

$d_7$  -  $\sigma_1^-$  - разрушающее напряжение при сжатии, МПа;

$d_8$  -  $E_1^+$  - модуль упругости при растяжении, МПа;

$d_9$  -  $E_1^-$  - модуль упругости при сжатии, МПа;

$d_{10}$  -  $\nu$  - коэффициент Пуассона;

$d_{11}$  -  $\Delta$  - усадка заливочного материала в прессформе, %;

$d_{12}$  -  $T_{\max}$  - максимальная температура при смешивании компонентов,

$d_{13}$  -  $\delta$  - относительное удлинение при растяжении, %;

$d_{14}$  - СОС - стойкость в окружающей среде (качественный параметр);

$d_{15}$  - УВВП - уровень влияния материала на экологическую безопасность и вредность в производстве (качественный параметр);

$d_{16}$  - ТВМП - технологические возможности материала при переработке (качественный параметр);

$d_{17}$  -  $C_{\text{мат}}$  - стоимость одного килограмма материала, руб/кг.

## Морфокласс $\Lambda_5$ - "Соединения и законцовки"

В состав морфокласса  $\Lambda_5$  входят конструкторско-технологические решения законцовок нефтепромысловых и криогенных трубопроводов, апробированные на практике в реальных конструкциях [93-101].

Среди петлевых законцовок можно выделить основной тип конструкции - "колокольчик", разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Соединения будем классифицировать по функционально - эксплуатационным признакам. Выделим два подкласса :

1. Разъемные 2. Неразъемные

В свою очередь в классах выделим следующие типы :

В разъемных

1. Фланцевые 2. Резьбовые 3. Клиновые 4. Фрикционные

В неразъемных

1. Клеевые 2. Сварные

Тип характеризует способ соединения непосредственно с другой трубой или соединительной муфтой.

В соответствии с представленной классификацией в различных источниках были найдены следующие варианты конструкторских решений.

### Класс "Разъемные" Тип "Фланцевые".

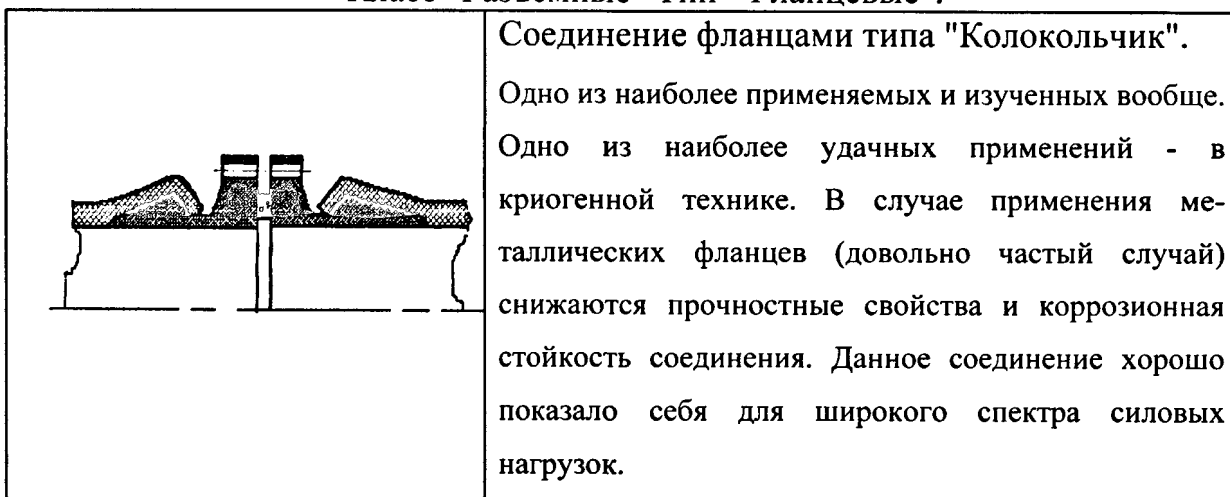


Рис. 3.8. Фланцевое соединение

### Подкласс "Разъемные" Тип "Резьбовые".

На рис.3.9. представлены конструкторские варианты резьбовых законцовок.


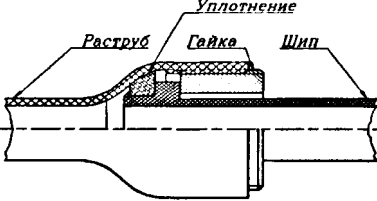

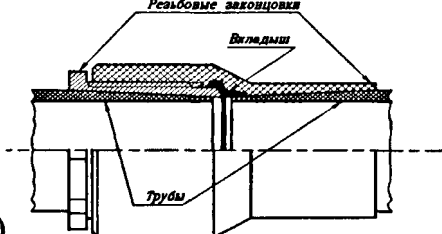
 <p>a)</p>	<p><b>Простое резьбовое соединение.</b>          Резьба, как правило, трубная возможно применение всевозможных уплотняющих составов и вкладышей. Используется в частности для нефтяных магистральных труб и обсадных труб скважин.</p>
 <p>б)</p>	<p><b>Резьбовое соединение с гайкой.</b>          Данное соединение способно работать при больших давлениях. Не допускает подвижности фитингов. Разработка фирмы Карбопласт Кунстштофферк.</p>
 <p>в)</p>	<p><b>Резьбовое соединение с соединительной муфтой.</b>          Данное соединение разработано с целью предотвращения застоя и концентрирования стоков. С этой целью применяется прижимное кольцо. Кроме этого происходит защита поверхности резьбы. А исследования фирмы показали, что разрушение резьбового соединения от эрозии происходит интенсивнее, чем трубы.</p>
 <p>г)</p>	<p><b>Резьбовое с вкладышем.</b>          Данное соединение способно работать при больших давлениях. Законцовки наклеиваются на трубу на предприятии. Разработка фирмы Америкон.</p>

Рис. 3.9. Резьбовые соединения

## Класс "Разъемные" Тип "Клиновое"

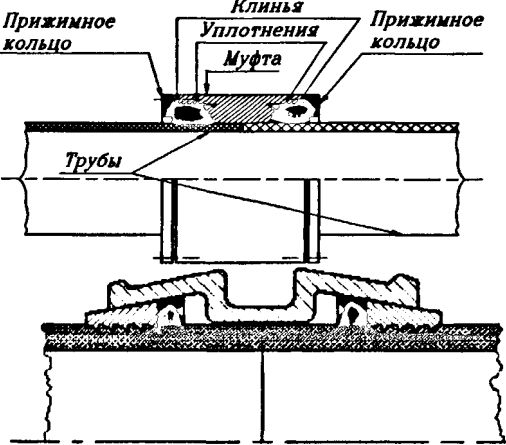
	<p><b>Разъемное клиновое соединение.</b>          Представленное соединение работает без применения клея, передача усилия происходит за счет силы трения самозаклинивания. Преимуществом так же является то, что усилие скрепления деталей возрастает при увеличении нагрузки. Недостатки клиновых соединений в основном аналогичны недостаткам фланцевых соединений.</p>
---	---

Рис. 3.10. Клиновые соединения



## Подкласс "Неразъемные". Тип "Клеевые"

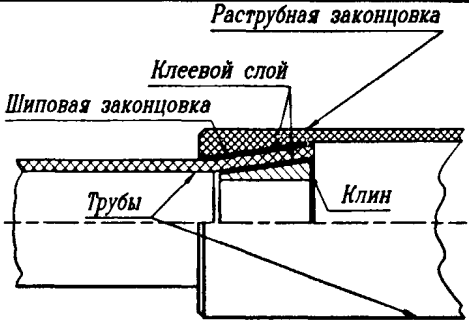
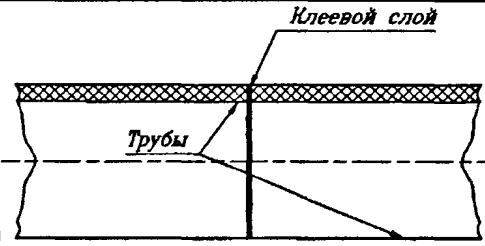
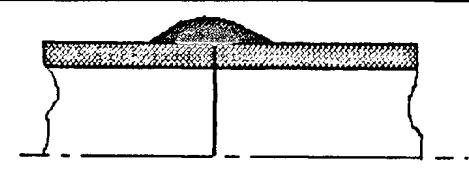
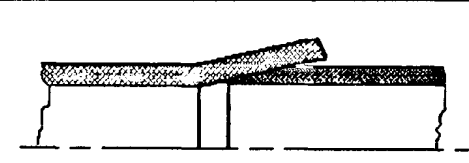
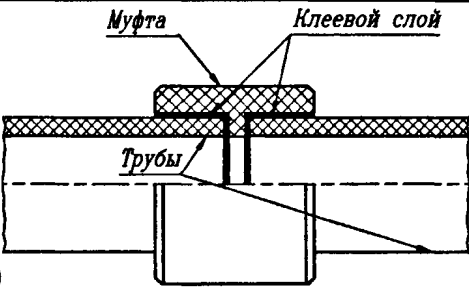
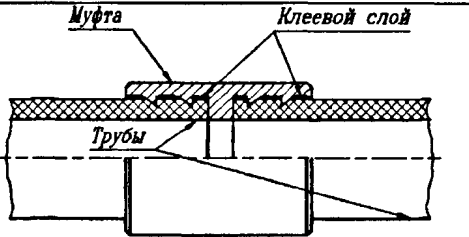
 <p>а)</p>	Клеевое соединение типа конусный клин.
 <p>б)</p>	Клеевое соединение встык.
 <p>в)</p>	Клеевое соединение встык с обмоткой.
 <p>г)</p>	Раструбное клеевое соединение.
 <p>д)</p>	Муфтовое клеевое соединение.
 <p>е)</p>	Клеевое соединение зубчатой муфтой.

Рис. 3.11. Клеевые соединения

Клеевые соединения в трубопроводах предназначены в основном для небольших давлений, так как силовые нагрузки воспринимаются клеевым слоем.

Основные недостатки технологии клеевых соединений определяются сложностью процесса сборки, необходимость подготовки поверхности перед сборкой, сложностью получения заданной длины. Предпочтительно использование конусных кромок (рис.3.11а), вследствие возможности в этом случае контроля толщины клеевого слоя.

В морфокласс  $\Lambda_5$  следует включать предпочтительные, с точки зрения производства, конструктивные решения законцовок.

В данном примере в морфокласс  $\Lambda_5$  включены следующие конструктивные решения законцовок:

$\lambda_{5,1}$  - раструб гладкий;  $\lambda_{5,2}$  - ниппель гладкий;  $\lambda_{5,3}$  - ниппель с кольцевыми канавками;  $\lambda_{5,4}$  - раструб с внутренней резьбой;  $\lambda_{5,5}$  - ниппель с наружной резьбой;  $\lambda_{5,6}$  - "колокольчик" вмотанный;  $\lambda_{5,7}$  - "колокольчик" монолитный;  $\lambda_{5,8}$  - "колокольчик" приваренный;  $\lambda_{5,9}$  - "колокольчик" вклеенный.

Законцовки  $\lambda_{53}$ - $\lambda_{55}$  предназначены в основном для разъемных соединений труб. Законцовки  $\lambda_{51}$ - $\lambda_{52}$ ,  $\lambda_{56}$ - $\lambda_{59}$  можно использовать как в разъемных, так и в неразъемных соединениях. В качестве параметров элементов морфокласса  $\Lambda_5$ , необходимых для проектирования законцовок, приняты следующие показатели:

$i_1$  - РД - рекомендуемые диаметры трубопроводов для выбранного соединения, мм;

$i_2$  - РРД - рекомендуемое максимальное рабочее давление для выбранного соединения, МПа;

$i_3$  -  $\Delta_3$  - предельные эксплуатационные перемещения законцовки, мм/м;

$i_4$  - КЗ - класс законцовки по отношению к классу соединения: разъемная (Р) и неразъемная (НР);

$i_5$  - ТЗ/СТ - тип законцовки по отношению к типу соединения трубопроводов: фланцевая (Ф), клеевая (К), сварная (С), резьбовая (Р), клиновья (К), фрикционная (ФР);

$i_6$  - ТЗ/СО - тип законцовки по отношению к технологии соединения с оболочками трубы: сварная (С), клеевая (К), вмотанная (В), монолитная (М);

$i_7$  - УВМС - уровень влияния конструкции и материала законцовки на увеличение массы соединения трубопроводов за счет необходимости применения компенсаторов (качественный параметр).

В компьютерной системе совмещенного проектирования морфокласс  $\Lambda_5$  связан с морфоклассами  $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \Omega_4$ . Поэтому в базе данных морфокласса  $\Lambda_5$  используются параметры элементов указанных морфоклассов, для чего в базе данных  $\Lambda_5$  сформировано пустое поле, которое заполняется разработчиком или экспертами в процессе проектирования конструкции и технологии изготовления законцовки.

В зоне законцовок распределение напряжений близко к напряжениям в прямолинейных трубопроводах. Соответственно, для определения геометрических размеров можно использовать те же расчетные формулы.

Возможно использование различных типов соединений и конструктивных решений. Тип соединения определяет геометрию и форму законцовок. Для нефтепромысловых трубопроводов наиболее рациональными являются резьбовые соединения.

Резьбовые соединения топливопроводов практически не влияют на массовые характеристики, отличаются надежностью при эксплуатации, простотой конструкции, обладают необходимой для нефтяных труб герметичностью и прочностью. Обычно резьба формируется в теле фасонного элемента в процессе намотки с помощью резьбовых калибров (внутренняя резьба) или специальных разъемных резьбовых форм (наружная резьба).

Для выбора параметров законцовки и соединения используется подсистему расчетных программ, которые позволяют осуществить быстрый расчет на этапе выбора конструкторско-технологических решений.

Расчет резьбы на срез:  $Q = \pi d_1 k_r H k_m \tau_B$ , (3.15)

где  $d_1$ - внутренний диаметр резьбы,  $k_r$ - коэффициент полноты резьбы ( $k_r=0.87$ -метрическая резьба,  $k_r=0.65$ -трапециидальная резьба),  $H$ - длина резьбы,  $k_m$ - коэффициент неравномерности нагрузки,  $\tau_B$ - прочность на срез.

Потребную высоту резьбы определяем по формуле:

$$H_{\text{потр.}} = \frac{1,25 Q_{\text{расч.}}}{\pi d_1 k_r k_m \tau_B} + p, \quad p - \text{ шаг резьбы.}$$

Расчет вматываемой части (см. рис. 3.12):

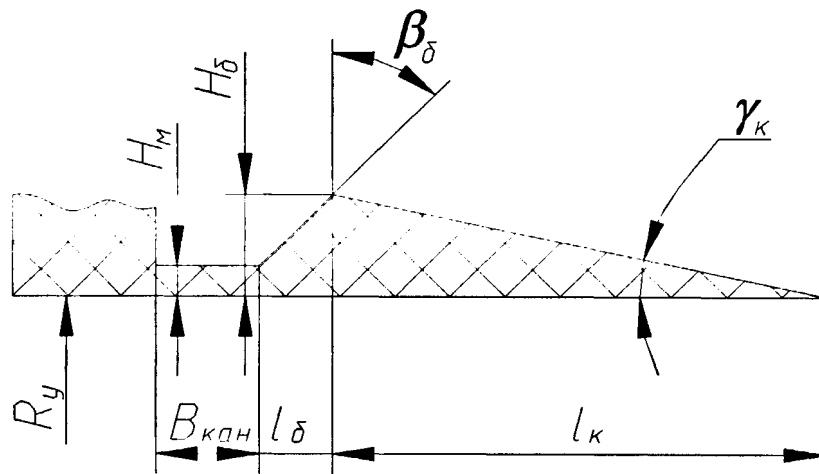


Рис. 3.12. Вматываемый участок законцовки

Высота бурта:  $H_б = 0,05 \cdot R_y$ , где  $R_y$  - внутренний радиус трубы,

Угол конуса:  $tg \gamma_к = 0,2$ , угол бурта:  $\beta_б$ ,

Толщина канавки:  $H_м = \frac{pR_y}{[\sigma_м]}$ , где  $p$  - внутреннее давление,

$\sigma_м$  - допустимый предел прочности материала законцовки.

Длина бурта:  $l_б = H_б tg \beta_б$ .

Длина конуса:  $l_к = \frac{H_б + H_м}{tg \gamma_к}$ .

Ширина канавки:  $B_{кан} = \frac{h_{км} \cdot R_y \cdot \sin \beta_{кр}}{h_б} \cdot \ln \left( \frac{0,75 \cdot R_y}{h_б} \right) + h_б \cdot tg \beta_б \left[ \frac{1}{2} - \frac{h_б}{12 \cdot (R_y + h_м + \frac{1}{2} \cdot h_б)} \right]$ ,

где  $h_{км}$  - толщина трубы.

### 3.4. Разработка морфологических блоков и баз данных технологии

#### изготовления фасонных элементов трубопроводов из ПКМ

**Морфокласс  $\Omega_1$  - "Технологические способы формования герметизирующих оболочек"**

Герметизирующие оболочки (гермослой), могут быть изготовлены из металлов, резин, термопластов, пленок и полимерных смоляных систем (морфокласс  $\Lambda_3$ ). В соответствии с выбранным материалом возможны соответствующие технологические способы формообразования:

1. Формообразование термопластичным литьем на термопластавтоматах.
2. Сварка встык.

Сварка является основным способом производства крупногабаритных соединительных деталей из ПЭВП и ПП. Коэффициент длительной прочности стыковых соединений, полученных с помощью нагретого инструмента, намного превышает таковой для соединений, выполненных газовой прутковой сваркой и сваркой экструдированной присадкой.

Сварка встык применяется также для сборки элементов трубопроводов из непластифицированного ПВХ, АБС-пластиков, других термопластов, а также металлов.

### 3. Склеивание.

Соединения труб из непластифицированного ПВХ осуществляют сваркой, склеиванием и комбинированием этих способов. Однако сварные соединения значительно уступают клеевым по прочности и монтажным качествам. Ударная вязкость материала сварного шва в несколько раз ниже, чем основного материала.

### 4. Намотка резинового гермослоя.

Намотку осуществляют, как правило, методом намотки на удаляемую оправку с последующей вулканизацией в печи. При этом намотка осуществляется на том же оборудовании, как и силовой слой.

### 5. Намотка пленочного герметизирующего лайнера на удаляемую оправку.

Герметизирующий слой из жестких полимерных пленок (полиимидных и лавсановых) часто является также и силовым слоем.

### 6. Намотка полимерного смоляного слоя из нетканых материалов.

Таким образом, выбор технологического способа формообразования герметизирующей оболочки определяется, в первую очередь, выбором материала (морфокласс  $\Lambda_3$ ), геометрией и формой (морфокласс  $\Lambda_1$ ).

Морфоклассы, относящиеся к технологии изготовления, формируются на базе имеющегося на конкретном предприятии технологического оборудования (станки, установки, термопечи и т.д.) и разработанных директивных технологических процессов.

Морфоблок  $\Omega_1$  формируют на базе таблицы параметров, которая содержит данные, необходимые для проверки пригодности технологического

способа изготовления лейнера по ограничениям, физической совместимости, а также параметры количественного и качественного характера для расчета функций полезности и платы за полезность.

В морфокласс  $\Omega_1$  входят следующие элементы:  $\omega_{11}$  – литьё на термопластавтоматах;  $\omega_{12}$  – склеивание труб из ПВХ;  $\omega_{13}$  – сварка труб из термопластов;  $\omega_{14}$  – намотка пленки с последующим склеиванием;  $\omega_{15}$  – намотка пленки с последующим спеканием;  $\omega_{16}$  – намотка полимерно-смоляной системы с последующим отверждением;  $\omega_{17}$  – намотка резиноподобных материалов с последующей вулканизацией.

В качестве параметров элементов морфокласса  $\Omega_1$ , необходимых для выбора технологического способа формообразования гермослоя, приняты следующие показатели:

- $F_1$  – ДФ - допустимая форма, реализуемая данным технологическим способом:  
Тр. - тройник, К. - крестовина;
- $F_2$  –  $D_{\min}$ - $D_{\max}$  - минимальный и максимальный диаметры трубопровода, реализуемые на данном оборудовании, мм;
- $F_3$  –  $L_{\max}$  - максимальная длина элемента, реализуемая на данном оборудовании, мм;
- $F_4$  –  $h_{\min}$  - минимальная реальная толщина материала, получаемая данным технологическим способом, мм;
- $F_5$  –  $\beta_{\min}$ ÷ $\beta_{\max}$  - допустимый диапазон углов намотки на данном оборудовании, град;
- $F_6$  –  $T_{\max}$  - максимальная температура термообработки, обеспечиваемая выбранным оборудованием. К;
- $F_7$  –  $b_{\max}$  - максимальная ширина сформированной ленты для данного оборудования, мм;
- $F_8$  – УВ/С - уровень влияния технологического способа, применяемого оборудования и оснастки на увеличение технологической себестоимости трубопроводов, кач.;
- $F_9$  – УВ/Т - уровень влияния технологического способа, оборудования и оснастки на увеличение трудоемкости изготовления, кач.;
- $F_{10}$  – УВ/Q - уровень влияния технологического способа на уменьшение герметичности трубопровода, кач.;

$F_{11}$  - УВ/КИМ - уровень влияния технологического способа на увеличение коэффициента использования материала, кач.;

$F_{12}$  - УВ/Δ - уровень влияния технологического способа на нестабильность механических свойств и геометрических размеров трубопровода, кач.;

$F_{13}$  - УВ/ЭБ - уровень влияния технологического способа на экологическую безопасность и вредность производства, кач.

Параметры элементов морфокласса  $\Omega_1 - \omega_{14}$  и  $\omega_{15}$  используются в системе совмещенного проектирования также для выбора и оценки способа формообразования наружной защитной оболочки криогенных трубопроводов.

Если в качестве гермослоя выбрана полимерно-смоляная система, то для выбора способа ее формообразования следует воспользоваться морфоблоком  $\Omega_2$ , поскольку в нем содержится необходимая информация по всем способам намотки.

### **Морфокласс $\Omega_2$ - "Технологические способы намотки и отверждения силовых композитных оболочек"**

При проектировании конструкции преследуется цель достижения минимальной массы при заданных эксплуатационных нагрузках и с выполнением ограничения по себестоимости продукции. При этом выполняется оптимизация структуры армирования и геометрии силовой оболочки для выбранных материалов и вида армирующего наполнителя, исходя из условия сохранения прочности, устойчивости, выполнения ограничений по деформативности, теплофизическим характеристикам и т.п. В технологической подсистеме, располагая паспортом КР, разработчик осуществляет выбор технологических способов и приемов, реализующих заданные конструктивные параметры и минимизирующих критерии выбора наилучших КТР, оказывает влияние на верхний уровень - пространство параметров КР. Таким образом, процесс проектирования силовой оболочки увязывается с технологическими решениями и по существу становится единым процессом с иерархической структурой принятия решений.

Выбор технологического способа формообразования силовой оболочки методом намотки из волокнистых полимерных композитов определяет следующие структурные, механические и экономические показатели,

влияющие на расчетные конструктивные параметры: степень армирования композита; пористость материала; технологические остаточные напряжения, степень повреждения армирующего наполнителя; допуск на толщину материала конструкции; точность реализации заданной схемы армирования; время достижения заданной степени отверждения; время намотки силовой оболочки; долевого вклада в трудоемкость изготовления и себестоимость.

В свою очередь, эти показатели зависят от технологических приемов и режимов, типа и вида армирующего материала, его текстильных характеристик, применяемого оборудования, способа отверждения, геометрии конструкции и т.п.

Выбор технологических способов намотки и отверждения определяется, в первую очередь, наличием технологического оборудования - намоточных станков, установок для термообработки, оправок и т.п. На большинстве предприятий имеются намоточные станки типа РПН, СНП, КУ, НК отечественного производства. На этих станках можно реализовать следующие технологические способы изготовления силовых композитных оболочек, которые и составляют морфокласс  $\Omega_2$ :  $\omega_{21}$  - спиральная "сухая" намотка;  $\omega_{22}$  - спиральная "мокрая" намотка;  $\omega_{23}$  - совместная спирально-кольцевая "сухая" намотка;  $\omega_{24}$  - совместная спирально-кольцевая "мокрая" намотка;  $\omega_{25}$  - прямая (окружная) "сухая" намотка;  $\omega_{26}$  - прямая "мокрая" намотка;  $\omega_{27}$  - выкладка (для зоны пересечения основной трубы и патрубка);  $\omega_{28}$  - изготовление тройника врезкой и склеиванием труб.

Технологический цикл формообразования силовой оболочки неразделим и включает следующие стадии: намотка и получение заготовки оболочки; нагрев заготовки на оправке до температуры стеклования связующего; нагрев до температуры отверждения связующего, выдержка - отверждение связующего при постоянной температуре; охлаждение до температуры стеклования и далее до конечной температуры; съем изделия с оправки.

Рассмотрим технологические способы отверждения и некоторые технологические приемы, которые при этом используются с целью улучшения структуры, механических свойств, сокращения времени и максимальной температуры отверждения материала оболочки. Процесс отверждения



характеризуется температурно-временной зависимостью и давлением формования при отверждении. Температура и время отверждения, как правило, определяются ТУ на связующие. Таким образом, приоритетным параметром является давление формования, которое влияет на структуру, степень армирования, механические характеристики композита. Кроме того, этот параметр учитывается в математической модели расчета условий потери устойчивости герметизирующего лайнера от остаточных напряжений силовой оболочки после снятия с оправки.

Таблица 10

Технологические способы намотки и отверждения силовых оболочек (фрагмент)

Параметры				Элементы морфокласса			
Назнач.	Код	Обознач.	Разм.	$\omega_{21}$	$\omega_{22}$	$\omega_{28}$	
Проверка по ограничениям	G <sub>1</sub>	НВН	-	Т	Т	Т	Т
	G <sub>2</sub>	РФ	-	Тр, Кр	Тр, Кр	Тр, Кр	Тр, Кр
	G <sub>3</sub>	D <sub>max</sub>	мм	300	300	600	300
	G <sub>4</sub>	L <sub>max</sub>	мм	1500	1500	9000	1500
	G <sub>5</sub>	$\delta_{min}$	мм	1,0	1,0	1,0	0,8
	G <sub>6</sub>	$\beta_{min} - \beta_{max}$	град	0°- 90°	0°- 90°	15°- 90°	30°- 90°
	G <sub>7</sub>	b <sub>max</sub>	мм	50	50	200	50
	G <sub>8</sub>	M <sub>Σ</sub>	кг	300	300	800	300
	G <sub>9</sub>	Н	Н	400	400	600	400
	G <sub>10</sub>	T <sub>max</sub>	К	473	523	473	523
Расчёт функций полезности и платы за полезность	G <sub>11</sub>	УВ/С	кач.	Высокий	Высокий	Высокий	Оч.высокий
	G <sub>12</sub>	УВ/Т	кач.	Средн.	Высокий	Средн.	Оч.высокий
	G <sub>13</sub>	УВ/Р	кач.	Низкий	Высокий	Низкий	Высокий
	G <sub>14</sub>	УВ/КИМ	кач.	Оч.низк.	Оч.низк.	Оч.низк.	Оч.низк.
	G <sub>15</sub>	УВ/ЭБ	кач.	Средн.	Средн.	Средн.	Средн.
	G <sub>16</sub>	УВ/Δ	кач.	Средн.	Низкий	Средн.	Низкий
	G <sub>17</sub>	УВ/РПВ	кач.	Средн.	Оч.высок	Средн.	Оч.высокий
Технологическое оборудование, оснастка	Намоточный станок			PUMA-762	PUMA-762	РПН-380	СНП-3
	Оправка			$\omega_{51}$	$\omega_{51}$	$\omega_{51}$	$\omega_{52}$
Способ отверждения	ТКО			+		+	
	АВТ				+		+
Оборудование для термообработки	Термокамерная печь			АРП-2		АРП-2	
	Автоклавы				'Sholz'		'Sholz'

Поэтому в морфокласс  $\Omega_2$  включены элементы, отличающиеся технологическим способом создания давления формования при отверждении и механизмом нагрева материала:

- 1- термокамерное отверждение в печи с наружной опрессовкой (викелевкой) кремнеземными лентами, термоусадочными пленками, силиконовыми резинами и т.п. (ТКО);
- 2- автоклавное отверждение (АВТ);

В качестве параметров элементов морфокласса  $\Omega_2$  приняты следующие показатели:

- $G_1$ - НВН - нерекомендуемый вид наполнителя: Л - лента, Ж - жгут, Р - ровница, Т - ткань;
- $G_2$  - РФ - рекомендуемые формы трубопровода, реализуемые данным способом намотки: Т - тройник, К. - крестовина;
- $G_3$ -  $D_{\max}$  - максимальный диаметр трубопровода, реализуемый на данном оборудовании, мм;
- $G_4$ -  $L_{\max}$  - максимальная длина трубопровода, реализуемая на данном оборудовании, мм;
- $G_5$ -  $\delta_{\min}$  - минимальная толщина оболочки, реализуемая данным способом намотки при выбранном виде наполнителя, мм;
- $G_6$  -  $\beta_{\min}$  -  $\beta_{\max}$  - минимальный и максимальный углы намотки, возможные на данном намоточном станке, град;
- $G_7$  -  $b_{\max}$  - максимальная ширина сформированной ленты на данном намоточном станке, мм;
- $G_8$  -  $M_{\Sigma}$  - максимальная масса оправки с наматываемым изделием для данного станка, кг;
- $G_9$  - Н - максимальное натяжение ленты на данном оборудовании, Н;
- $G_{10}$  -  $T_{\max}$  - максимальная температура, достижимая в термокамере. К;
- $G_{11}$  - УВ/С - уровень влияния способов намотки и отверждения, применяемого оборудования и оснастки на увеличение технологической себестоимости трубопроводов, кач.;
- $G_{12}$  - УВ/Т - уровень влияния способов намотки и отверждения, применяемого оборудования на увеличение трудоемкости изготовления, кач.;

- G<sub>13</sub> - УВ/Р - уровень влияния способов намотки и отверждения на повышение величины разрушающего давления, кач.;
- G<sub>14</sub> - УВ/КИМ - уровень влияния способа намотки на увеличение коэффициента использования материала, кач.;
- G<sub>15</sub> - УВ/ЭБ - уровень влияния способов намотки и отверждения на экологическую безопасность и вредность производства, кач.;
- G<sub>16</sub> - УВ/Δ - уровень влияния способов намотки и отверждения на нестабильность механических свойств и геометрию трубопровода, кач.
- G<sub>17</sub> - УВ/РПВ - уровень влияния выбранного материала, способа намотки и отверждения на увеличение коэффициента реализации исходной прочности волокон, кач.

В таблице 10 приведен фрагмент технологической базы данных для морфокласса Λ<sub>4</sub>.

#### **Морфокласс Ω<sub>3</sub> - "Технологические способы формообразования теплоизоляционных оболочек"**

Многообразие способов получения вспененных пластмасс значительно расширяет возможности их использования и позволяет в каждом конкретном случае выбрать такой способ, который в наибольшей степени отвечает требованиям конструкции, возможностям производства и в то же время позволяет изготовить теплоизоляционную оболочку (ТИО) фасонного элемента с минимальными затратами за минимальное время.

Можно выделить три элемента морфокласса Ω<sub>3</sub>: ω<sub>31</sub> - способ напыления теплоизоляционного покрытия на наружную оболочку с последующей механической обработкой; ω<sub>32</sub> - способ формования теплоизоляционного материала в пресс-форме; ω<sub>33</sub> - способ заливки непосредственно на наружную оболочку фасонного элемента.

При выборе пресс-формы для заливки на тройник следует рассчитать максимальное давление, которое достигается при вспенивании компонентов теплоизоляционного материала в закрытом объеме, и давление, которое сможет выдержать трубопровод при всестороннем сжатии. В случае превышения давления газов силовая оболочка может разрушиться или потерять устойчивость

Для проверки способа по технологическим ограничениям и для расчета функций полезности и платы за полезность в качестве параметров взяты следующие показатели:

- $J_1$  – РФ - рекомендуемые формы фасонных элементов, для которых возможно формование ТИО данным способом: Т. - тройник, Кр. - крестовина;
- $J_2$  –  $D_{\min}$ - $D_{\max}$  - рекомендуемые минимальный и максимальный диаметры элементов, для которых возможно формование ТИО данным способом, мм;
- $J_3$  –  $L_{\max}$  - рекомендуемая максимальная длина элемента, для которой возможно формование ТИО данным способом, мм;
- $J_4$  –  $h_{\min}$ - $h_{\max}$  – рекомендуемые минимальная и максимальная толщины формируемых ТИО данным способом, мм;
- $J_5$  –  $P_{\max}$  – максимальное давление формования на стенку пресс-формы при вспенивании пенопластов в закрытом объеме, МПа;
- $J_6$  –  $T_{\max}$  – максимальная температура нагрева силовой оболочки фасонных элементов при формовании на ней ТИО, К;
- $J_7$  – УВ/С - уровень влияния способа формования ТИО и применяемой оснастки на увеличение технологической себестоимости фасонных элементов, кач.;
- $J_8$  – УВ/Т - уровень влияния способа формования ТИО и применяемой оснастки на увеличение трудоемкости изготовления фасонных элементов, кач.;
- $J_9$  – УВ/КИМ - уровень влияния способа формования ТИО на увеличение КИМ, кач.;
- $J_{10}$  – УВ/ЭБ – уровень влияния способа формования ТИО на экологическую безопасность и вредность производства, кач.;
- $J_{11}$  – УВ/П – уровень влияния способа формования ТИО на увеличение плотности структуры материала, кач..

#### **Морфокласс $\Omega_4$ - "Технологические способы соединения законцовок с оболочками трубопровода"**

Вид законцовки в фасонном элементе трубопровода выбирается с помощью морфоблока  $\Lambda_5$ , в котором содержится вся необходимая информация для наиболее применяемых конструкций законцовок. Однако, технология соединения законцовки и силовой оболочки может быть различной даже для одного и того же типа законцовки.

Все известные технологические способы соединения законцовки с трубой можно свести к пяти видам, которые составили элементы морфокласса  $\Omega_4$ :  $\omega_{41}$  -

соединение сваркой;  $\omega_{42}$  - соединение склеиванием;  $\omega_{43}$  - соединение вматыванием законцовки в процессе намотки;  $\omega_{44}$  - формообразование монолитных законцовок в процессе намотки с последующей механической обработкой или с использованием резьбовых знаков;  $\omega_{45}$  - соединение комбинаций вышеуказанных способов (сварно-клеевые, вмотанно-клеевые и т.п.).

Большое значение для выбора способа соединения имеет материал законцовки и затраты, необходимые для изготовления самой законцовки тем или иным технологическим способом. Поэтому в морфоблоке  $\Omega_4$  эти показатели должны быть учтены.

В качестве параметров элементов морфокласса  $\Omega_4$  приняты следующие показатели:

- $H_1$  - НКМ - nereкомендуемый класс материалов для данного способа соединения;
- $H_2$  -  $T_{\text{тах}}$  - максимальная температура в зоне сварки при намотанной силовой оболочке, а также при термообработке клеевых, вмотанных и комбинированных законцовок для данного способа, К;
- $H_3$  -  $D_{\text{мах}}$  - максимально допустимый наружный диаметр законцовки, который можно использовать в данном способе, мм;
- $H_4$  - УВ/С - уровень влияния технологического способа получения законцовки и способа соединения законцовки с фасонным элементом на увеличение технологической себестоимости, кач.;
- $H_5$  - УВ/Т - уровень влияния технологического способа получения законцовки, способа соединения, применяемой оснастки и оборудования на увеличение трудоемкости изготовления, кач.;
- $H_6$  - УВ/К - уровень влияния технологического способа на качество соединения (герметичность, прочность соединения), кач.;
- $H_7$  - УВ/М - уровень влияния технологического способа на увеличение массы фасонного элемента трубопровода, кач.;
- $H_8$  - УВ/ЭБ - уровень влияния технологического способа получения законцовки и способа её соединения на экологическую безопасность и вредность производства, кач.

## Морфокласс $\Omega_5$ - "Технологические оправки для фасонных элементов трубопроводов методом намотки"

Технологические оправки как функциональные технологические элементы системы изготовления фасонных элементов трубопроводов, предназначены для намотки герметизирующей и силовой оболочек, установки законцовок, отверждения намотанных оболочек, формирования теплоизоляционных оболочек и намотки наружной защитной оболочки. Поэтому выбор конструкции оправки, материала оправки, способа ее сборки и удаления во многом определяют качество изготавливаемой конструкции.

Из практики производства изделий из ПКМ известно применение разборных металлических оправок или удаляемых оправок - растворимых, выплавляемых, разрушаемых [8,90,95]. Такие оправки изготавливают в специальных формах из плавких солей (С), алебастров (А), парапластов (ПП) и песчанополимерных смесей (ППС). Иногда оправки изготавливают из алюминиевых сплавов, которые потом вытравливаются кислотами или щелочами. Намотку чаще всего производят на технологических оправках, отформованных из смеси речного песка с поливиниловым спиртом.

В морфологический класс  $\Omega_5$  включены следующие элементы:  $\omega_{51}$  - разборные металлические и комбинированные оправки;  $\omega_{52}$  - удаляемые оправки вымыванием, растворением или разрушением.

В качестве параметров элементов морфокласса  $\Omega_5$  используются следующие показатели:

$K_1$  - РФ - рекомендуемые формы для данного типа оправок;

$K_2$  -  $D_{\max}$  - рекомендуемый максимальный диаметр фасонного элемента трубопровода, рекомендуемый для данного типа оправок, мм;

$K_3$  -  $L_{\max}$  - рекомендуемая максимальная длина элемента, реализуемая на данном типе оправок, мм;

$K_4$  -  $M_{\text{расч}}$  - расчетная масса оправки для выбранного материала и геометрии, кг;

$K_5$  -  $h_{\max}$  - расчетное значение максимального прогиба оправки при установке на намоточном станке, мм;

- $K_7$  -  $T_{\max}$  - максимально допустимая температура оправки при отверждении намотанной композитной оболочки. К;
- $K_8$  -  $P_{\max}$  - расчетное значение предельного контактного давления, при котором оправка не разрушается и не прогибается выше установленного предела, кг/см<sup>2</sup>;
- $K_9$  - УВ/С - уровень влияния типа оправки, технологии ее изготовления и условий ее эксплуатации на увеличение технологической себестоимости фасонного элемента трубопровода, кач.;
- $K_{10}$  - УВ/Т - уровень влияния типа оправки, технологии ее изготовления и условий ее эксплуатации на увеличение трудоемкости изготовления, кач.;
- $K_{11}$  - УВ/Δ - уровень влияния типа оправки на повышение точности геометрических размеров, кач.;
- $K_{12}$  - УВ/ЭБ - уровень влияния типа оправки на экологическую безопасность и вредность производства, кач.

#### **Справочная базы данных оборудования и оснастки для производства фасонных элементов трубопроводов**

При формировании альтернативных КТР фасонных элементов трубопроводов одним из важных компонентов, определяющих выбор КТР и его приоритет, является состав технологического оборудования и технологической оснастки, посредством которых реализуется данное КТР в производстве.

Выбранный намоточный станок, термовакуумная печь или автоклав, та или иная пресс-форма, та или иная оправка, во многом определяют технико-экономическую эффективность КТР. Производительность, качество, стоимость оборудования или оснастки, энергетические затраты на осуществление операции и т.п. в конечном счете являются платой за полезность.

Для выбора оборудования разработана справочная база данных оборудования и оснастки (СБДО), которая взаимосвязана с морфоклассами технологии ( $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$ ). СБДО содержит необходимые для расчета технологической себестоимости (платы за полезность) параметры отечественного оборудования. В СБДО представлены: 1 - база данных по намоточным станкам; 2 - база данных по термопечам; 3 - база данных по технологическим оправкам для намотки; 4 - база

данных по пресс-формам для изготовления ТИО. В СБДО включена номенклатура оборудования и оснастки одного из предприятий.

В базе данных имеются два блока параметров: 1 - конструкторско-технологические ограничения; 2 - параметры выбора. Первый блок позволяет выбрать из ряда станков только те, на которых возможно реализовать синтезированное КТР с учетом предельных возможностей станка, а второй блок необходим для оценки приоритета станков с учетом их стоимости и потребляемой энергии. В первом приближении это основные параметры, которые определяют выбор намоточного оборудования лицом принимающим решения из возможных альтернативных вариантов КТР.

При оценке приоритета станка рассчитывается стоимость оборудования в виде амортизационных отчислений по формуле:  $C_{ам} = \frac{C_{ст} \cdot k_{ам} \cdot T_{об\zeta}}{100 \cdot \Phi}$  (3.16)

где  $C_{ст}$  - первоначальная балансовая стоимость с учетом переоценок, руб;  $k_{ам}$  - общая норма амортизации станка, %/год;  $T_{об\zeta}$  - время намотки оболочек, час;  $\Phi$  - эффективный годовой фонд времени (при односменной работе с двумя выходными днями,  $F=2077$  час/год).

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = N \cdot T_{об\zeta} \cdot \eta_n \cdot \zeta_{квт}, \quad (3.17)$$

где  $N$  - потребляемая мощность станка, кВт;  $\eta_n$  - коэффициент, учитывающий потери в сети и коэффициент полезного действия двигателей ( $\eta_n > 0,85$ );  $\zeta_{квт}$  - цена за 1 кВт/час энергии.

Для выбора предпочтительной термопечи при выполнении конструкторско-технологических ограничений используют те же два параметра - потребляемую мощность (расход электроэнергии) и балансовую стоимость печи с учетом амортизационных отчислений. Каждому типоразмеру фасонного элемента трубопровода должна соответственно проектироваться и изготавливаться своя технологическая оправка. Но при этом, в зависимости от типа оправки, широко применяются типовые или стандартные решения, которые апробированы на производстве и представлены в СБДО.

### 3.5. Создание укрупненного техпроцесса

После синтеза вариантов необходимо для выбранных КТР подготовить



технологическую документацию и выбрать необходимое оборудование и оснастку. Используя матрицу связности (формула 3.5) выбираются морфологические классы технологии связанные с конструкторским решением тройника трубопровода. Для создания техпроцесса создается база данных соответствия параметров морфоклассов  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$  операциям обобщенного техпроцесса и база данных соответствия операций техпроцесса технологическому оборудованию и оснастке. Основные операции техпроцесса представлены в табл. 11.

Табл.11

## Основные операции техпроцесса

Формообразование герметизирующей оболочки (морфокласс $\Omega_1$ ).	1. Формообразование герметизирующей оболочки термопластичным литьем на термопластавтоматах.
	2. Экструзия труб из полимерных материалов.
	3. Сварка встык герметизирующей оболочки из трубных элементов.
	4. Сварка лайнера с законцовками.
	5. Склеивание герметизирующей оболочки с законцовками.
Подготовительные операции.	6. Визуальный осмотр поверхности, мест сварки и проверка на герметичность лайнера с законцовками.
	7. Сборка лайнера с технологической оправкой или заполнение его внутренней полости подкрепления тонкостенной герметизирующей оболочки.
	8. Установка и закрепление оправки с лайнером на намоточном станке.
Намотка силовой оболочки (морфокласс $\Omega_2$ ).	9. Расчет и изготовление управляющих программ для намотки силовой оболочки.
	10. Приготовление полимерного связующего, загрузка его в пропиточную ванну, заправка и пропитка армирующих нитей, изготовление непрерывной ленты намоточного препрега.
	11. Закрепление бобин с намоточным препрегом на вертлюге намоточного станка и настройка натяжителей на расчетное технологическое натяжение намоточной ленты.
	12. Обезжиривание наружной поверхности лайнера.
	13. Закрепление конца намоточной ленты на наружной поверхности лайнера и намотка силовой оболочки расчетной толщины под расчетными углами.
	14. Выкладка силовой оболочки из тканого материала.

	15. Намотка антиадгезионного разделительного слоя фторопластовой пленки на наружную поверхность силовой оболочки.
	16. Намотка технологических слоев термоусаживающейся ленты на разделительный слой и закрепление конца ленты на намотанных слоях.
	17. Установка технологической оправки с намотанной оболочкой в нагревательную печь и проведение полимеризации связующего в соответствии с рекомендованными режимами.
	18. Установка технологической оправки с намотанной оболочкой в автоклав и проведение полимеризации связующего в соответствии с рекомендованными режимами.
	19. Извлечение оправки с изделием из печи, размотка слоев термоусаживающейся ленты, снятие разделительного слоя пленки.
	20. Осмотр и контроль поверхности силовой оболочки, удаление отвердевших натеков связующего с фланцев и поверхности оболочки.
Формообразование теплозащиты (морфокласс $\Omega_3$ ).	21. Установка и закрепление оправки с изделием в жесткую, предварительно смазанную антиадгезионным покрытием, разъемную пресс-форму с расчетным зазором между силовой оболочкой и внутренней поверхностью пресс-формы.
	22. Нагрев пресс-формы с изделием до значений температур, заданных технологическим регламентом.
	23. Приготовление состава вспенивающегося криогенного пенопласта, например типа "Викорт-3", и быстрая заливка его в отверстие пресс-формы.
	24. Выдержка пресс-формы с изделием при заданных технологией температурах.
	25. Разборка пресс-формы и осторожное извлечение из нее оправки с изделием, с обеспечиванием сохранности кромок нанесенного теплоизолирующего покрытия.
	26. Напыление теплоизоляционного покрытия на наружную оболочку.
	27. Мехобработка теплоизоляционного покрытия после напыления.
	28. Разборка технологической оправки и удаление ее из внутренней полости готового трубопровода.
Контроль.	29. Визуальный контроль изделия, устранение исправимых недостатков, гидропрессовка изделия в соответствии с правилами и мерами предосторожности, действующими для данного типа изделий.

### 3.6. Создание конструкторско-технологической документации для синтезированных вариантов

После синтеза вариантов необходимо для выбранных КТР подготовить конструкторскую и технологическую документацию. Она включает в себя: 1- чертёж тройника, как сборочной единицы, 2- чертежи деталей (например, законцовок), 3-маршрутный техпроцесс изготовления тройника. Для этого создаются параметризованные детали, соответствующие морфоклассам конструкции  $\Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4, \Lambda_5$ .

К настоящему времени системы автоматизированного проектирования (Catia, UniGraphics, Pro Engineer, Solid Works, I-DEAS) позволяют создать параметризованную твердотельную модель изделия. Таким образом, передав геометрические параметры варианта в модель изделия, автоматически получаем 3-х мерное представление детали. С твердотельной моделью связан чертёж детали. Обновление твердотельной модели приводит к автоматическому обновлению видов чертежа изделия.

Для геометрического моделирования конструкций произвольной формы и процессов их формообразования целесообразно применять средства конструкторских САПР как наиболее развитой и апробированной среды геометрического моделирования, использующей различные методы ввода и аппроксимации кривых, поверхностей, тел при создании моделей объектов и дифференциальную геометрию при их анализе. Математическое описание моделей объектов и методы их анализа в такой среде прозрачны для пользователя. Среда предоставляет пользователю результаты анализа созданных моделей объектов в дифференциальном (полные, частные и смешанные производные) и интегральном (длины, площади, объёмы) виде. Используя их и встроенные средства программирования, можно выполнить необходимые прикладные вычисления и построения.

Solid Works предъявляет меньшие требования к ресурсам компьютера и имеет дополнительный модуль для автоматизированного создания трубопроводов, поэтому при создании модели использовалась эта система.

Конструкторским морфоклассам  $\Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4, \Lambda_5, \Lambda_6$  соответствуют детали  $D_2, D_3,$

$D_4, D_5, D_6$ . Вариант представляет собой сборку, состоящую из деталей  $D_2-D_6$ .

Законцовки могут иметь различные конструктивные решения, поэтому для каждого из используемых вариантов законцовок необходимо создать свою модель.

Рассмотрим вариант разработки модели законцовки для конструктивных решений  $\lambda_{56}, \lambda_{57}, \lambda_{58}, \lambda_{59}$  - "колокольчик".

Параметры модели:  $d_y$  – условный проходной диаметр тройника,  $h_\phi$  – толщина цилиндрического участка,  $b_{кан}$  – ширина канавки,  $t_l$  – ширина ленты,  $h_6$  – высота бурта,  $\gamma_{мак}$  – угол входного конуса.

В табл. 12 представлен вид таблицы параметров для модели законцовки, а на рис.3.12. вид модели соответствующий  $d_y=100$ .

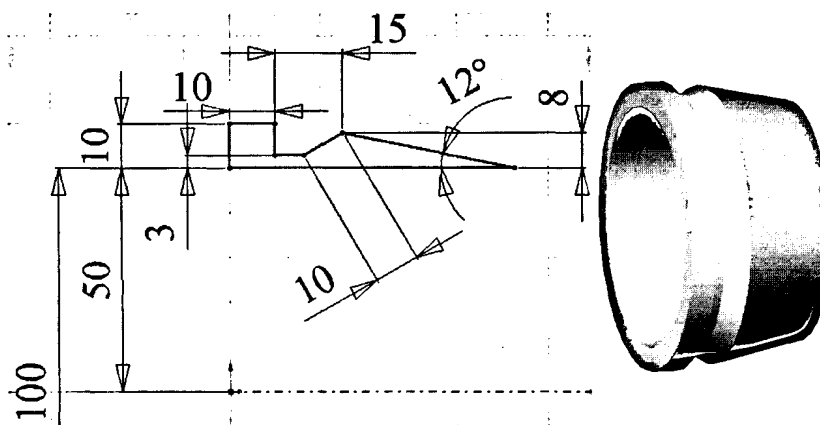


Рис. 3.13. Эскиз и твердотельная модель

Табл.12

Таблица параметров.

№	$d_y@sketch1$	$h_\phi@sketch1$	$b_{кан}@sketch1$	$t_l@sketch1$	$h_6@sketch1$	$\gamma_{мак}@sketch1$
1	100	3	15	10	8	12
2	50	2	12	8	5	12

Аналогично создаются модели для морфоклассов  $\Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4$ .

Параметр модели морфокласса  $\Lambda_2$  - "Герметизирующая оболочка":  $h$  – толщина герметизирующей оболочки.

Параметры модели морфокласса  $\Lambda_3$  - "Силовая оболочка":  $h_1$  – толщина силовой оболочки для основной трубы,  $h_2$  – толщина силовой оболочки патрубка,  $h_3$  – толщина в зоне пересечения основной трубы и патрубка.

Параметр модели морфокласса  $\Lambda_4$  - "Теплоизоляционная оболочка":  $h$  – толщина теплоизоляционной оболочки.

Также в модели используются параметры морфокласса  $\Lambda_1$ :  $a_3 - L_1$  - длина

основной трубы, мм;  $a_4 - L_2$  - длина патрубков, мм.

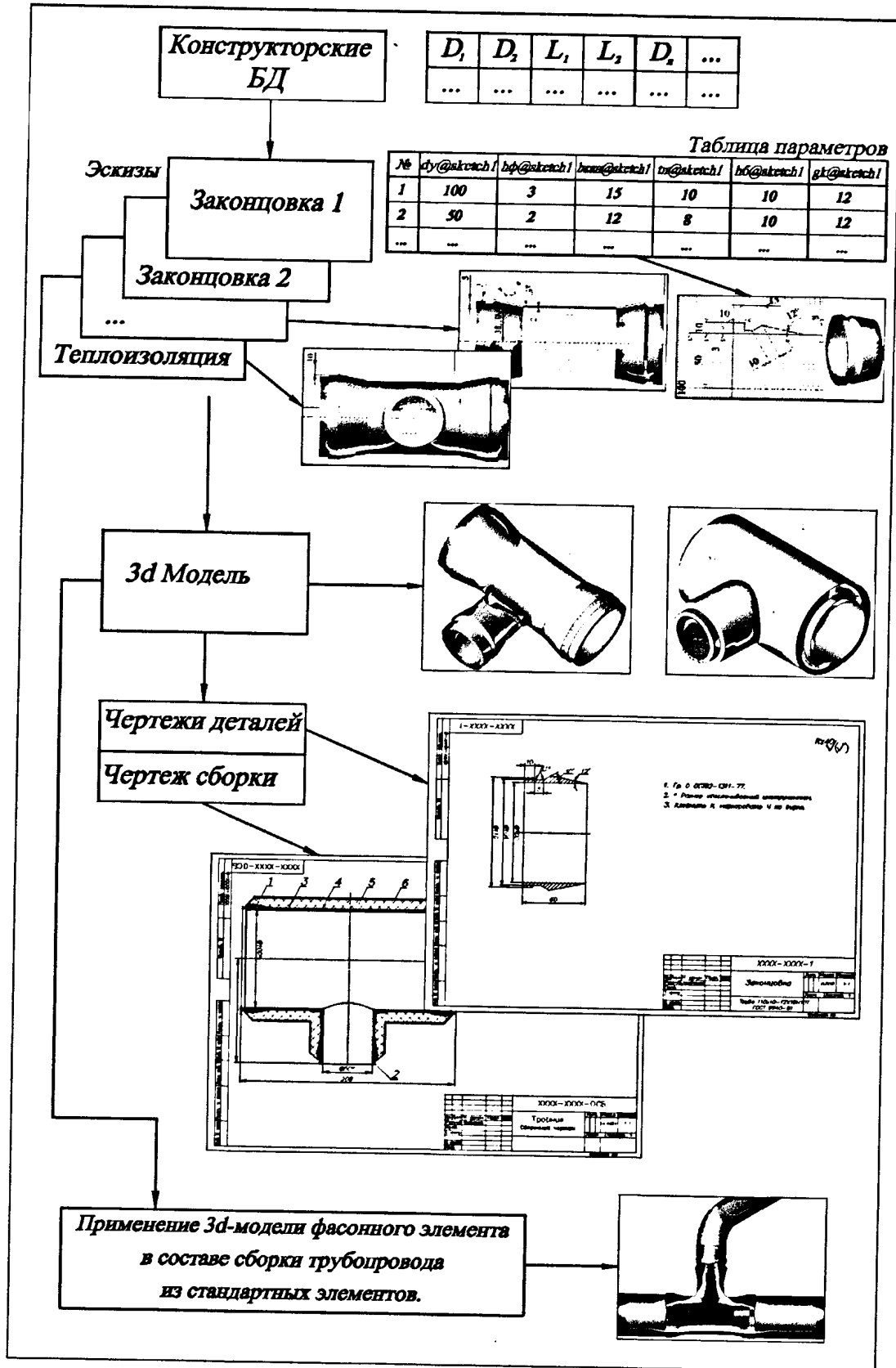


Рис. 3.14. Автоматизация КД для синтезированных вариантов

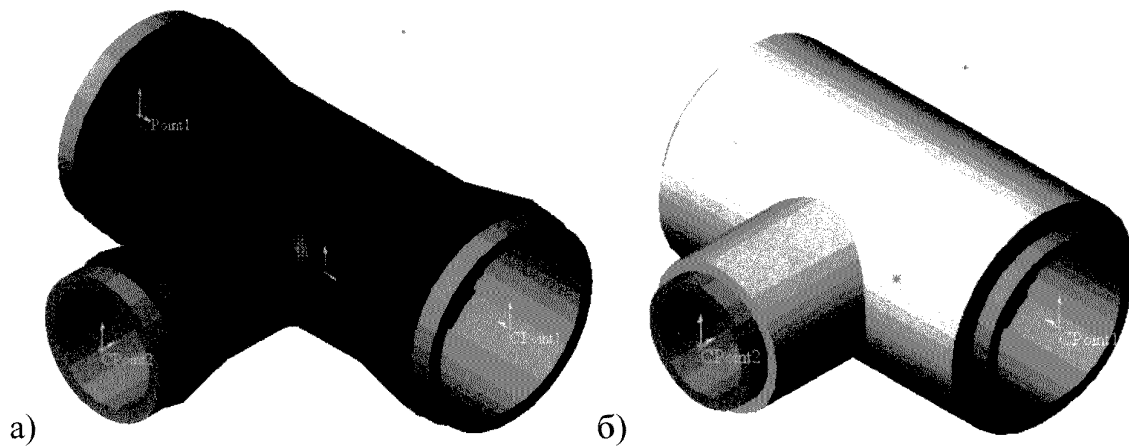


Рис. 3.15. 3-х мерная модель тройника.

а) без теплоизоляции; б) с теплоизоляцией

На рис. 3.15 показана 3-х мерная модель тройника, созданная из моделей морфоклассов.

Принципиальная модель автоматизации проектирования представлена на рис.3.14. По созданной 3d-модели тройника автоматически создаются чертежи, кроме того, модель тройника является частью 3-х мерной модели трубопровода, которая необходима для создания рациональной компоновки и проверки отсутствия пересечения труб.

### **Выводы по главе 3:**

1. Используемые в третьей главе модели позволяют провести синтез и выбор оптимальных КТР. Были разработаны морфоклассы конструкции и технологии изготовления фасонных элементов трубопроводов из ПКМ, позволяющие осуществить синтез КТР.
2. Для выбранных КТР создана схема синтеза технологических процессов, которая позволяет, используя операции техпроцесса и базу связи, создавать техпроцесс для выбранного варианта технологии.
3. Рассмотрены методы автоматизации подготовки чертежной документации и приведен пример создания 3<sup>x</sup> мерной модели тройника.

## ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРИОГЕННОГО ТРОЙНИКА ЛА И НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ТРОЙНИКА

В данной главе приводятся примеры практического использования разработанных моделей конструкторско-технологического проектирования и расчета для решения конкретных задач выбора предпочтительных конструкторско-технологических решений криогенных тройников авиационного назначения и тройников внутрипромысловых трубопроводов.

### **4.1. Анализ технического задания на разработку криогенного тройника летательного аппарата**

В настоящее время в разрабатываемой технике находят широкое применение криогенные топливопроводы для авиационной (пассажирские “криогенные” ТУ-204 и ТУ-216) и ракетной (12КРБ, КВРБ, “Ангара”) техники. Сложность конструкции и монтажа трубопроводов, особенно для криогенных топливных магистралей, обусловлена свойствами разнообразных рабочих тел (водород, кислород, метан), схемами закрепления и действующими нагрузками, а также большой протяженностью из-за последовательного расположения отдельных агрегатов, отсеков и систем двигательной установки. Для осуществления этих проектов необходимо новое поколение криогенных топливопроводов различного назначения.

Рассмотрим основные технические требования, необходимые для совмещенного конструкторско-технологического проектирования криогенных тройников из ПКМ, для перспективного ЛА.

#### **1. Условия эксплуатации.**

Условия эксплуатации для различных типов тройников представлены в табл.13.

#### **2. Функциональные показатели.**

1. Ресурс (для всех типов) - 300 циклов эксплуатации (1 цикл - 3 путевых часа). Подтверждается при стендовых и путевых испытаниях по программе Государственных испытаний.
2. Календарный срок эксплуатации с двумя переборками - 10 лет (для всех

типов). Подтверждается на стенде по эквивалентной ускоренной программе.

3. Герметичность (по группам в соответствии с ОСТ 100128-74): 2-8.
4. Теплоприток к рабочей среде из окружающей среды, Вт/п.м.:
  - для типа В: для диаметра 32 - 23.1; для диаметра 50 - 32.8; для диаметра 200 - 112.4.
  - для типа Г: для диаметра 20 - 8.85; для диаметра 50 - 17.32; для диаметра 100 - 31.46.

Таблица 13

## Технические требования к тройникам

		Рабочие среды	Температура рабочей среды, К	Рабочее давление в тройниках.		
				дренажный	подачи к двигателю	система заправки
А	внутрибаковые	Жидкий и газообразный винил, газообразный гелий, газообразный азот, СПГ	13.8-400	до 0.5	до 2.5	до 2.5
Б		Жидкий и газообразный оксид, газообразный гелий, газообразный азот, СПГ	55-300	до 0.5	до 2.5	до 2.5
В	внебаковые	Жидкий и газообразный винил, газообразный гелий, газообразный азот, СПГ	13.8-400	до 0.5	до 2.5	до 2.5
Г		Жидкий и газообразный оксид, газообразный гелий, газообразный азот, СПГ	55-300	до 0.5	до 2.5	до 2.5
Д		Газообразный гелий	13.8-400	—	—	до 10.0

### 3. Прочностные показатели.

1. Коэффициент безопасности  $n > 2.5$ .
2. Надежность:
  - наработка на отказ, приводящий к досрочному съему -  $2 \cdot 10^4$  час;
  - среднее время восстановления при отказе, приводящем к срыву задания, для трубопровода в целом - 30 суток, отдельные элементы трубопроводов восстановлению не подлежат.

### 4. Требования к конструкции.

1. Конструкция тройников всех типов должна обеспечивать возможность очистки внутренних полостей до 9 класса чистоты по ГОСТ 17216-71.
2. Тройники должны соединяться разъемными соединениями, обеспечивающими возможность монтажа и демонтажа трубопроводов.
3. Внутренняя поверхность тройника должна быть технически гладкой  $Rz=20$ .



4. Внебаковые тройники должны быть защищены от статического электричества.
5. В зоне монтажа трубопроводов категорически запрещается наличие жировых веществ.
6. Материалы, используемые в конструкции тройников типа Б и Г, не должны гореть при данных условиях эксплуатации. Тройники остальных типов допускается изготавливать из самозатухающих материалов.

#### 6. Унификация.

Для каждого типа тройника, для одинаковых диаметров - полная взаимозаменяемость.

#### 7. Сохраняемость.

1. Допустимое время хранения на объекте:  
с консервацией - 15 лет; без консервации - 10 лет.

В соответствии с ТЗ основными исходными параметрами для разработки конструкции и технологии изготовления тройника на стадии рассмотрения альтернативных вариантов являются:

1. Внутренние диаметры:  $D_y=200$  мм,  $d_y=100$  мм.
2. Габаритные размеры  $L_1=500$  мм,  $L_2=300$ .
3. Форма фасонного элемента - тройник.
4. Тип соединения - НР.
5. Рабочая среда - сжиженный природный газ (СПГ).
6. Температура рабочей среды 117 К, окружающей среды 117 - 323 К.
7. Рабочее давление в трубопроводе - 2.0 МПа.
8. Предельная масса тройника -  $M^*_{тр} < 2,5$  кг.
9. Предельная масса законцовки -  $M_{зак.} < 0,240$  кг ( $\varnothing 200$  мм).
12. Герметичность соединений и регулярной части - 2-8 группа (не более  $10^{-3}$  л·мкм·рт.ст./с).
13. Применение металлов в конструкции не допускается.
14. Ресурс работы - 900 путевых часов (300 циклов).
15. Техническая себестоимость -  $C_{тех} \Rightarrow \min$ ; Трудоемкость -  $T_{тех} \Rightarrow \min$  (для серийного производства).

## 4.2. Совмещенное конструкторско-технологическое проектирование криогенного тройника

На первом этапе в соответствии с алгоритмом совмещенного конструкторско-технологического проектирования формируется совокупность КСС криогенных тройников и функциональная схема техпроцесса, а затем совокупность морфологических классов конструкций и технологий изготовления связанных между собой матрицами связности. Возможные КСС криогенных тройников представлены в таблице 14.

Таблица 14

Возможные КСС криогенных тройников

Тип топливопровода	Обозначение КСС	Материалы и элементы конструкции, входящие в КСС			
		Герметизирующая оболочка	Силовая оболочка	Теплоизоляционная оболочка	законцовка
Внебаковый напорный	ВН-КСС-1	пленка	композит(намотка)	ППУ заливочный	композит
	ВН-КСС-2	пленка	пленка(намотка)	ППУ заливочный	композит
	ВН-КСС-3	термопласт	композит(намотка)	ППУ напыляемый	ТП(вмотанные)
	ВН-КСС-4	термопласт	композит(намотка)	ППУ заливочный	ТП(вмотанные)
	ВН-КСС-5	термопласт	композит(выкладка)	ППУ заливочный	ТП(вмотанные)
	...	...	...	...	...
Внутрибаковый напорный	БН-КСС-1	пленка	композит(намотка)	-	композит
	БН-КСС-2	пленка	пленка(намотка)	-	композит
	БН-КСС-3	термопласт	композит(намотка)	-	ТП(вмотанные)
	БН-КСС-4	термопласт	композит(выкладка)	-	ТП(вмотанные)
	БН-КСС-5	термопласт	ТП	-	ТП(вмотанные)
	...	...	...	...	...

ППУ – ПЕНОПОЛИУРЕТАН, ТП – ТЕРМОПЛАСТ

Выбор КСС осуществляется с помощью решающих правил, имеющих условный вид: "Если (посылка), то (исход)". В соответствии с исходными техническими требованиями на основе решающих правил, представленных в таблице 15, были получены две возможные КСС криогенного тройника: БН-КСС-3 и БН-КСС-5.

Выбор указанных КСС означает, что для формирования КТР тройников на этапе синтеза используются морфоклассы  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$ ,  $\Lambda_3$ ,  $\Lambda_5$ . Используя матрицу связности (см. формулу 3.5) получим, что этим конструкторским морфоклассам соответствуют технологические морфоклассы  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ ,  $\Omega_4$ ,  $\Omega_5$ .

Рассмотрим содержание этапов совмещенного конструкторско-технологического проектирования напорного внутрибакового тройника.

Решающие правила базы знаний выбора КСС трубопроводов

№ п/п	Переменная	Решающие правила	
		условия	исход
1	Тип тройника	Если тройник внутрибаковый, то ...	БН-КСС-1, БН-КСС-2, БН-КСС-3, БН-КСС-4, БН-КСС-5
2	Рабочая среда	Если рабочая среда СПГ, то ...	ВН-КСС-1, ВН-КСС-2, ВН-КСС-3, ВН-КСС-4, ВН-КСС-5, ...
3	Рабочее давление	Если разрушающее давление до 5 МПа, то ...	ВН-КСС-1, ВН-КСС-2, ВН-КСС-3, ВН-КСС-4, ВН-КСС-5, ...
4	Герметичность	Если допустимые утечки СПГ до $10^{-3}$ л·мкм.рт.ст./с, то ...	ВН-КСС-1, ВН-КСС-2, ВН-КСС-3, ВН-КСС-4, ВН-КСС-5, ...
5	Тип соединения	Если соединение неразъемное, то ...	ВН-КСС-3, ВН-КСС-4, ВН-КСС-5, БН-КСС-3, БН-КСС-4, БН-КСС-5, ...
6	Ограничения на материал	Если металлы не допускаются, то ...	ВН-КСС-1, ВН-КСС-2, ВН-КСС-3, ВН-КСС-4, ВН-КСС-5, ...

### 1. Формирование исходных ФКЭ по ограничениям ТЗ.

В соответствии с требованиями ТЗ основными параметрами, которые накладывают ограничения на элементы морфоклассов, являются: 1 - уровень хемостойкости материала в среде O<sub>2</sub>, СПГ; 2 - диапазон температур эксплуатации трубопровода.

### 2. Проверка на физическую совместимость ФКЭ.

Все допущенные к синтезу элементы сравниваются попарно между собой для выявления тех элементов, которые или не могут совместно работать в конструкции, или их совместная работа малоэффективна (см. формулу 3.4).

Алгоритм проверки на физическую совместимость элементов морфоклассов криогенных тройников сходен с алгоритмом проверки для криогенных трубопроводов, разработанном в докторской диссертации Буланова И.М. [7].

В практике разработки трубопроводов из ПКМ обычно в качестве признаков физической совместимости выбирают:

- 1 – коэффициент относительного удлинения в диапазоне температур эксплуатации;
- 2 – коэффициент линейного термического расширения;
- 3 – допустимые температуры совместного отверждения герметизирующей,

силовой оболочек и законцовок;

4 – степень адгезионной прочности сцепления силовой и герметизирующей оболочек и материала законцовок к материалам оболочек топливопровода.

3. Проверка по ограничению на массу тройника (см. формулу 3.3).

4. Проверка элемента на герметичность.

Для проверки на герметичность используется метод, описанный в диссертации Буланова И.М.[7].

Количество среды, десорбировавшей за время  $\tau$  ( $\tau \gg 0$ ) через оболочку неравномерной толщины, равно сумме потоков через участки поверхности  $S$ , с близкими значениями толщин  $h$ :  $Q = \tau \cdot P \cdot (S_1 / h_1 + S_2 / h_2 + \dots + S_n / h_n)$

Индексы соответствуют: 1- основная труба, 2 – патрубок, 3- основная труба + накладка, 4- патрубок + накладка.

Проводим проверку  $Q(P, S_i, h_i) < Q_{дон}$  для всех вариантов.

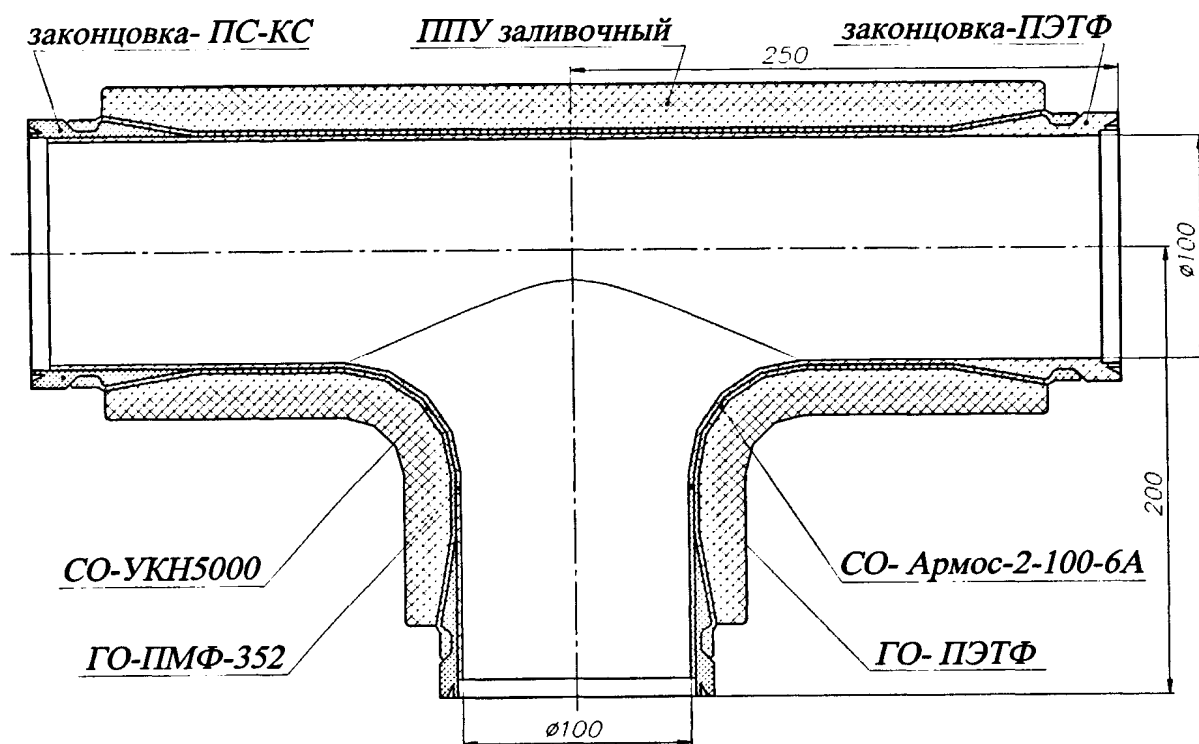


Рис.4.1. Конструктивная схема криогенного тройника

Для тройника, изображенного на рис. 4.1. основные геометрические параметры, необходимые для предварительного расчета массы и проверки на

герметичность:  $V_{\text{трубы}}=5,23 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$ ,  $S_{\text{пов.осн.трубы}}=140000 \text{ мм}^2$ ,  $S_{\text{пов.патрубка}}=43000 \text{ мм}^2$ ,  $S_{\text{накладки}} \approx 18000 \text{ мм}^2$ .

Процедура отсеивания элементов конструкторских морфоклассов по ограничениям ТЗ и физической совместимости синтезированных элементов между собой показала, что в качестве конструктивно-силовой схемы для тройников могут быть выбраны схемы ВН-КСС-1 и ВН-КСС-3.

Для выбранной КСС ВН-КСС-1 путем построения диагональных матриц отсева в соответствии с указанными ограничениями, элементами морфоклассов  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$ ,  $\Lambda_3$ ,  $\Lambda_4$ ,  $\Lambda_5$ , которые допущены к синтезу конструкторских решений на этом этапе, являются:

в морфоклассе  $\Lambda_1$  -  $\lambda_{11}$ ;

в морфоклассе  $\Lambda_2$  -  $\lambda_{29}$ ,  $\lambda_{210}$ ,  $\lambda_{211}$ ;

в морфоклассе  $\Lambda_3$  -  $\lambda_{31}$ ,  $\lambda_{32}$ ,  $\lambda_{33}$ ,  $\lambda_{34}$ ,  $\lambda_{35}$ ,  $\lambda_{36}$ ,  $\lambda_{37}$ ,  $\lambda_{38}$ ,  $\lambda_{39}$ ;

в морфоклассе  $\Lambda_4$  -  $\lambda_{41}$ ,  $\lambda_{42}$ ,  $\lambda_{43}$ ,  $\lambda_{44}$ ,  $\lambda_{45}$ ,  $\lambda_{46}$ ;

в морфоклассе  $\Lambda_5$  -  $\lambda_{51}$ ,  $\lambda_{52}$ ,  $\lambda_{56}$ ,  $\lambda_{57}$ ,  $\lambda_{58}$ ,  $\lambda_{59}$ .

Синтезированы решения:

в морфоклассе  $\Lambda_1$  -  $\lambda_{11}$ ;

в морфоклассе  $\Lambda_2$  -  $\lambda_{2,9}$  - пленка полиэтилентерефталатная (лавсановая);

$\lambda_{2,10}$  - пленка полиимидная ПМФ-352;

$\lambda_{2,11}$  - пленка полиимидная металлизированная ПИ-М;

в морфоклассе  $\Lambda_3$  -

$\lambda_{3,4}$  - углепластик однонаправленный жгутовой УКН-5000/ЭДТ-10;

$\lambda_{3,6}$  - углепластик однонаправленный нитяной ВМН-4/ЭДТ-10;

$\lambda_{3,8}$  - органопластик однонаправленный жгутовой Армос2-100-6А-ЭХД;

в морфоклассе  $\Lambda_4$  -  $\lambda_{4,3}$  - пенополиуретан заливочный ППУ-И1;

$\lambda_{4,5}$  - пенопласт на основе полиизоцианата, заливочный, Виласт-1;

$\lambda_{4,6}$  - пенопласт на основе полиизоцианата, заливочный, Викорт-1М;

в морфоклассе  $\Lambda_5$  -  $\lambda_{5,6}$  - "колокольчик" вмотанный;

$\lambda_{5,7}$  - "колокольчик" монолитный;

$\lambda_{5,9}$  - "колокольчик" клеенный.

Колокольчик монолитный формируется в процессе изготовления трубопровода и поэтому он может быть получен из материалов герметизирующей или силовой оболочек, т.е. из материалов, входящих в морфокласс  $\Lambda_2$  и  $\Lambda_3$  -  $\lambda_{2,9}$ ,  $\lambda_{2,10}$ ,  $\lambda_{2,11}$ ,  $\lambda_{3,4}$ ,  $\lambda_{3,6}$ ,  $\lambda_{3,8}$ .

Вмотанные и клеенные колокольчики - законцовки изготавливаются отдельно методом термопластичного литья или прессованием и материалом для них могут быть термопласты класса полиалканимидов (ПАИ-С-ЭК-3) и класса полисульфонов (ПС-КС), свойства которых записаны в базах данных морфокласса  $\Lambda_2$  -  $\lambda_{2,17}$  и  $\lambda_{2,18}$  соответственно.

В результате выполнения проверки синтезированных конструкторских решений по технологическим ограничениям выделены следующие элементы технологических морфоклассов, допущенные к синтезу конструкторско-технологических решений:

- $\Omega_1$  -  $\omega_{14}$  (технологический способ намотки герметизирующей оболочки с последующим склеиванием).
- $\omega_{15}$  (технологический способ намотки герметизирующей оболочки с последующим спеканием).
- $\Omega_2$  -  $\omega_{21}$  (спиральная намотка силовой оболочки "сухим" способом с отверждением в термокамерной печи или в автоклаве).
- $\omega_{22}$  (спиральная намотка силовой оболочки "мокрым" способом с отверждением в термокамерной печи или в автоклаве);
- $\omega_{27}$  (выкладка для зоны пересечения основной трубы и патрубка).
- $\Omega_3$  -  $\omega_{33}$  (способ заливки непосредственно на наружную оболочку фасонного элемента).
- $\Omega_4$  -  $\omega_{43}$  (технологический способ вматывания законцовок при намотке оболочек).
- $\omega_{44}$  (технологический способ формообразования монолитных законцовок

в процессе намотки трубы).

- $\omega_{45}$  (технологический способ комбинированного формирования законцовок).

$\Omega_5$  -  $\omega_{52}$  – удаляемая вымыванием оправка.

Общее количество синтезированных вариантов, удовлетворяющих ТЗ и условиям физической совместимости - 180.

Используя схему синтеза техпроцесса, представленную на рис.3.11 формируем маршрутный техпроцесс, соответствующий выбранным элементам морфоклассов технологии (табл. 16).

Таблица 16

Маршрутный техпроцесс изготовления криогенного тройника

1. Подготовка комплектующих и материалов.
2. Сборка лейнера с технологической оправкой
3. Установка и закрепление оправки с лейнером на намоточном станке.
4. Расчет и изготовление управляющих программ для намотки герметизирующей и силовой оболочки.
5. Обезжиривание наружной поверхности лейнера.
6. Намотка герметизирующей оболочки.
7. Спекание ГО./ Термообработка ГО.
8. Склеивание законцовок с ГО./Формообразование законцовок.
9. Намотка силовой оболочки расчетной толщины под расчетными углами.
10. Термообработка силовой оболочки.
11. Вымывание песчаной оправки.
12. Визуальный контроль изделия, гидропрессовка изделия.

Синтезированные конструкторско-технологические варианты используются в дальнейшем для выбора предпочтительных вариантов с использованием функций полезности и платы за полезность. В качестве показателя полезности принимается  $\frac{k_{\text{без}} \cdot P_{\text{раб}} \cdot V}{M_{\Sigma}}$  (см. формулу 3.11), а в качестве платы за полезность – технологическая себестоимость (формула 3.12). Ограничение массы конструкции элементов ЛА приводит к выбору конструкторских решений с использованием материалов с высокими удельными характеристиками (например, для силовой оболочки – углепластиков).

### 4.3. Выбор конструктивно-технологических параметров силовой оболочки

В процессе проектирования силовой оболочки тройника необходимо связать расчет на прочность с технологией изготовления и схемой армирования. Расчет методом конечных элементов позволяет определить зоны с недостаточной прочностью и уточнить схему намотки.



Рис. 4.2. Интеграция CAD, МКЭ, расчета схемы намотки

Обобщенная схема интеграции CAD, МКЭ, расчета траектории намотки представлена на рис. 4.2.

Для тройника, изготавливаемого по схеме намотки, представленной на рис. 1.14, 1.15 схема разбиения на конечные элементы представлена на рис. 4.3. При этом для каждого конечного элемента возможна корректировка направления материала в соответствии с расчетом возможных схем намотки.

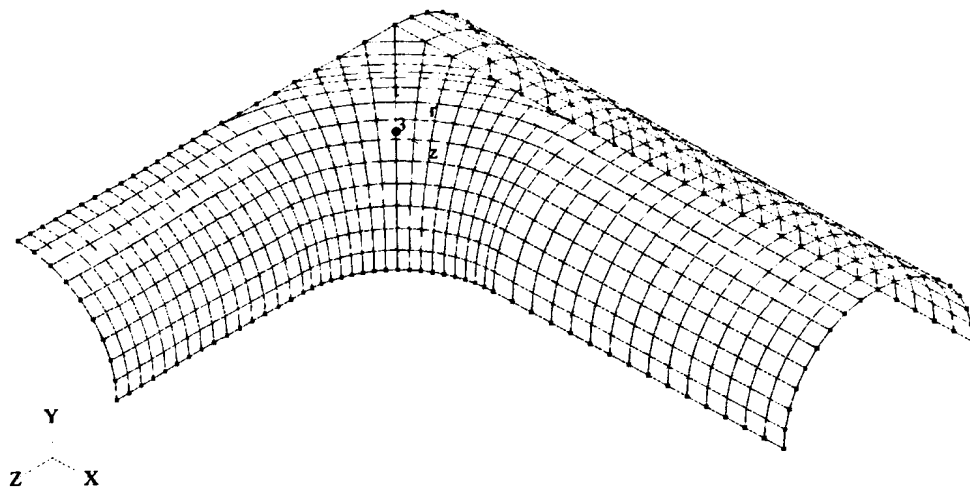


Рис. 4.3 Разбиение тройника с торовым участком в зоне пересечения на конечные элементы

Для прямолинейного участка толщина силовой оболочки определяется

$$\text{по формулам: } h_{oc} = \frac{k_{без} \cdot P_{раб} \cdot R}{2 \cdot [\sigma_1^+]}, \quad h_{ок} = \frac{k_{без} \cdot P_{раб} \cdot R}{[\sigma_1^+]}, \quad h_{\Sigma} = h_{ок} + h_{oc}.$$



Приняв  $\sigma_1^* \approx 1000 \text{ МПа}$ ,  $P_{\text{расч.}} = 5 \text{ МПа}$ ,  $R = 50 \text{ мм}$  получаем:  $h = \frac{5 \cdot 100}{2 \cdot 1000} + \frac{5 \cdot 100}{1000} = 0,75 \text{ мм}$ .

Для расчета конструкции с различными диаметрами патрубка и основной трубы был проведен оценочный расчет с использованием схемы разбиения на конечные элементы, разработанной в главе 2.

Т.к. в зоне пересечения основной трубы и патрубка напряжения значительно выше, чем в зоне безмоментного напряженного состояния, примем для проверочного расчета:  $H_{\text{осн. трубы}} = 2 \text{ мм}$ ,  $H_{\text{патрубка}} = 2 \text{ мм}$ ,  $H_{\text{накладки}} = 2 \text{ мм}$ .

Упругие характеристики материала несущих слоёв (УКН5000+ЭДТ-10) приняты следующими:  $E_1 = 140 \text{ ГПа}$ ,  $E_2 = 5 \text{ ГПа}$ ,  $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 5 \text{ ГПа}$ ,  $\nu_{12} = 0,33$ .

Схема армирования -  $(\pm\phi)_n$ . Толщина несущего слоя -  $h_{\text{сл.}} = 0,125 \text{ мм}$ .

На рисунке 4.4. приведен пример распределения напряжений вдоль волокон для варианта с усилением. Более подробный анализ НДС в зависимости от схемы армирования приведен на рис. 2.32а, 2.32б.

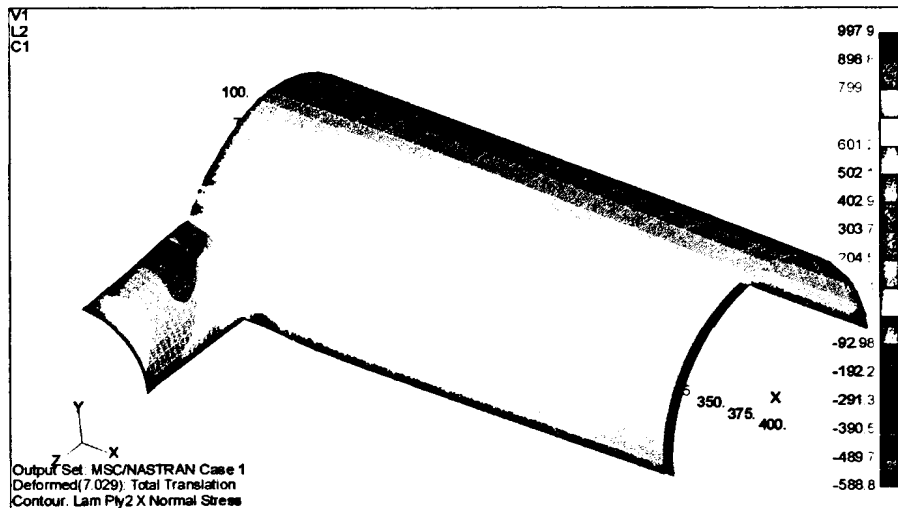


Рис.4.4 Распределение напряжений вдоль армирующих волокон в слое 2 с накладкой в зоне пересечения труб. Схема армирования  $(\pm 45^\circ)_n$

В таблице 17 приведены расчетные параметры для тройника ЛА с усилением в зоне пересечения патрубка и основной трубы.

Таблица 17

Параметры криогенного тройника ЛА

КР тройника	$d_{\text{вн.}}$ , мм	$M_{\Sigma}$ , кг	$P_{\text{расч.}}$ , МПа	$\sigma_{\text{расч.}}^{\text{max}}$ , МПа	$\frac{k_{\text{без.}} P_{\text{раб.}} V}{M_{\Sigma}}$ , км
$\lambda_{1,1}, \lambda_{2,10}, \lambda_{3,4}, \lambda_{5,6}$	100	0,750	5	1214	4,57

#### 4.4. Анализ технического задания на разработку нефтепромысловых тройников магистральных трубопроводов

Актуальность применения полимерных композиционных материалов для производства насосно-компрессорных труб и нефтепромысловых трубопроводов обусловлена тем, прогрессирующее обводнение месторождений, увеличение содержания в продукции агрессивных компонентов (сероводород, углекислый газ и т.п.), мероприятия по удалению отложений парафинов и солей на внутренней поверхности труб, применение различных методов интенсификации нефтеотдачи пластов (заводнение, закачка углекислого газа, различных химических реагентов) приводит к ужесточению условий эксплуатации труб, росту опасности коррозии, что в свою очередь, снижает ресурс работы стандартных стальных труб и отводов до 1 года у 10%, до 5 лет у 28%, и до 10 лет у 90% изделий.

Высокая коррозионная стойкость, прочность, низкая теплопроводность, вследствие чего замедляется или исключается процесс отложения парафина и солей, малый удельный вес - все это дает основание для применения композитов в производстве фасонных изделий для трубопроводов (тройники, крестовины, отводы и т.п.).

По этой причине ведущие нефтяные компании России заинтересованы в создании крупных производств труб и "фасонины".

Рассмотрим основные технические требования, необходимые для совмещенного конструкторско-технологического проектирования нефтепромысловых тройников из ПКМ.

1. Исходя из величин действующих эксплуатационных нагрузок, тройники должны иметь прочностные характеристики, обеспечивающие их надежную эксплуатацию при воздействии внутреннего давления от 4.0 до 20 МПа, температуры рабочей среды от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .
2. Геометрические размеры тройников: внутренний диаметр 70... 100 мм, наружный диаметр не более 120мм, тип законцовки и способ соединения с прямым участком трубопровода выбираются в процессе проектирования.
3. Материал тройника должен быть химически стойким в условиях

эксплуатации к нефтепромысловым жидкостям следующего состава:

- нефть, газовый конденсат, газ;
  - минерализованная пластовая вода с содержанием углекислого газа и сероводорода до 6% каждого. Водородный показатель pH -4.5...11.0.
4. Внутренняя поверхность тройника должна быть гладкой, ровной, без натеков, наплывов и ступенчатых переходов, иметь специальный герметизирующий слой.
  5. Конструкция узла соединения тройника с прямым участком трубопровода должна обеспечивать простоту и удобство монтажа в любое время года с использованием стандартного инструмента или без него, в условиях низких температур и в трассовых условиях. Она должна обеспечивать быструю замену тройников в случае выхода их из строя.
  6. Материал тройника должен быть химически стойким к реагентам, применяемым для депарафинизации:
    - смесь соляной (до 20%), уксусной (до 5%) кислот с добавлением ингибиторов коррозии;
    - серная кислота (до 80%), сода каустическая (до 20%);
    - смесь соляной (8-10%) и плавиковой кислот (3-5%).

Время воздействия реагентов до 72 часов.

7. Материал тройника должен быть стойким к эрозионному воздействию потока жидкости плотностью 800-1200 кг/м<sup>3</sup>, скоростью движения до 4 м/с и содержанием механических примесей до 1%.
8. Прокладка нефтепровода: 1 – подземная, в траншее глубиной до 1,5м;  
2 – открытая.
9. Экономические показатели продукции – минимальная трудоемкость изготовления и минимальная себестоимость при выпуске 500 тройников в год.
10. Тройники должны быть пригодны для использования в нефтесборных, водоводных магистралях, а также в трубопроводах поддержки пластового давления.

На основе анализа технического задания выделим значения тех характеристик тройника, которые необходимы для конструкторско-технологического проектирования.

1. Тип трубопровода – нефтесборный.
2. Рабочая среда – обводненная (до 98%) нефть от скважин.
3. Внутренний диаметр - 100мм (основная труба), 75мм (патрубок).
4. Наружный диаметр определяется внутренним давлением эксплуатации (не более 120 мм).
5. Рабочее давление –6,0 МПа.
6. Коэффициент безопасности – 2,5, давление разгерметизации более 15 МПа.
7. Температурный режим работы:
  - а) основной, при добыче нефти +15°С....+50°С;
  - б) при работах по депарафинизации до +100°С;
  - в) температура окружающей среды при эксплуатации тройников от -50°С до +60°С.
8. Прокладка нефтепровода – подземная, в траншее глубиной до 1,5м.
9. Масса тройника не более 3 кг.
10. Среднее время наработки до отказа - 100 000 часов.
11. Законцовка тройника – резьбовая.
12. Цена тройника должна быть минимальной, ниже цен зарубежных аналогов на 10-20%.

Далее рассмотрены основные этапы конструкторско-технологического проектирования тройника нефтесборного трубопровода.

#### **4.5. Совмещенное конструкторско-технологическое проектирование нефтепромыслового тройника поддержки пластового давления**

На первом этапе в соответствии с алгоритмом совмещенного конструкторско-технологического проектирования формируется совокупность КСС нефтепромысловых тройников и функциональная схема техпроцесса, а затем совокупность морфологических классов конструкций и технологий изготовления связанных между собой матрицами связности. Возможные КСС нефтепромысловых тройников представлены в таблице 18.

Возможные КСС нефтепромысловых тройников (фрагмент)

Тип тройника	Обозначение КСС	Материалы элементов, входящие в КСС		
		ГО	СО	Законцовки
Нефтеборовый	НС-КСС-1	ПСС (выкладка)	выкладка	КОМПОЗИТЫ
	НС-КСС-2	ПСС (выкладка)	выкладка+намотка	КОМПОЗИТЫ
	НС-КСС-3	ПСС (выкладка)	намотка	КОМПОЗИТЫ
	НС-КСС-4	ТП	выкладка+намотка	КОМПОЗИТЫ
	НС-КСС-5	ТП	выкладка	ТП
	НС-КСС-6	ТП	намотка	ТП
	...	...	...	...
Водоводный	В-КСС-1	ПСС (выкладка)	выкладка	КОМПОЗИТЫ
	В-КСС-2	ТП	ТП	ТП
	В-КСС-3	ПСС (выкладка)	выкладка+намотка	ТП
	В-КСС-4	ТП	выкладка	КОМПОЗИТЫ
	...	...	...	...
Поддержки пластового давления	ППД-КСС-1	ПСС (выкладка)	выкладка	КОМПОЗИТЫ
	ППД-КСС-2	ПСС (выкладка)	выкладка+намотка	КОМПОЗИТЫ
	ППД-КСС-3	ПСС (выкладка)	намотка	КОМПОЗИТЫ
	ППД-КСС-4	ТП	выкладка	ТП
	...	...	...	...

Примечания: ТП - термопласты, ПСС - полимерные смоляные системы.

Решающие правила БЗ концептуального решателя (фрагмент)

№	Переменная	Решающие правила	
		Условия	Исход
1	Тип тройника	Если тройник нефтеборовый, то ...	НС-КСС-1, НС-КСС-2, НС-КСС-3, НС-КСС-4, НС-КСС-5, НС-КСС-6, ...
2	Максимальная температура эксплуатации	Если температура выше 90°C, то ...	НС-КСС-1, НС-КСС-2, НС-КСС-3, ...
3	Тип соединения	Если соединение неразъемное, то ...	НС-КСС-4, НС-КСС-5, ...
4	Ограничения на материал	Если металлы не допускаются, то ...	НС-КСС-1, НС-КСС-2, НС-КСС-3, НС-КСС-4, НС-КСС-5, НС-КСС-6, ...

Выбор КСС осуществляется с помощью решающих правил, имеющих условный вид: "Если (посылка), то (исход)". В соответствии с исходными

техническими требованиями на основе решающих правил, представленных в таблице 19, были получены возможные КСС нефтесборного тройника: НС-КСС-1, НС-КСС-2, НС-КСС-4 и НС-КСС-5.

Выбор указанных КСС означает, что для формирования КТР тройников на этапе синтеза используются морфоклассы  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$ ,  $\Lambda_3$ ,  $\Lambda_5$ . Используя матрицу связности (формула 3.5) получим, что этим конструкторским морфоклассам соответствуют технологические морфоклассы  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ ,  $\Omega_4$  и  $\Omega_5$ .

Рассмотрим вариант тройника с геометрическими параметрами, представленными на рис.4.5. Основные геометрические параметры, необходимые для предварительного расчета массы и проверки на герметичность:

$$V_{\text{трубы}}=3821\text{см}^3, S_{\text{пов.осн.трубы}}=120834\text{мм}^2, S_{\text{пов.патрубка}}=37234\text{мм}^2,$$

$$S_{\text{накладки}}\approx 15000\text{мм}^2.$$

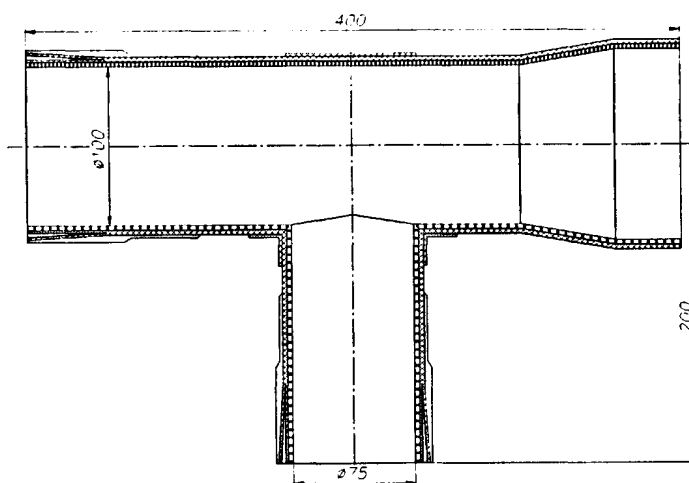


Рис. 4.5. Нефтепромысловый тройник

Процедура отсеивания элементов конструкторских морфоклассов по ограничениям ТЗ и физической совместимости синтезированных элементов между собой, выполненная в соответствии с разработанным алгоритмом, показала, что в качестве возможной конструктивно-силовой схемы для тройников могут быть выбраны схемы НС-КСС-1 и НС-КСС-2.

Все возможные решения схемы НС-КСС отсеяны в связи с

физической несовместимостью материалов герметизирующей и силовой оболочек по параметрам максимальной температуры отверждения (параметры  $B_{11}$  и  $C_{15}$ ).

Таким образом, для выбранных конструктивно-силовых схем НС-КСС-1 и НС-КСС-2 элементами конструкторских морфоклассов, допущенных к синтезу конструкторских решений являются:

в морфоклассе  $\Lambda_1 - \lambda_{1,1}$  (тройник);

в морфоклассе  $\Lambda_2 - \lambda_{2,14}$  (полимерная смоляная система ПСС-1 на основе нетканых материалов и эластичных эпоксидных связующих);

$\lambda_{2,15}$  (полимерная смоляная система ПСС-2 на основе тканых материалов и эластичных эпоксидных связующих);

$\lambda_{2,16}$  (полимерная смоляная система ПСС-3 комбинированная);

в морфоклассе  $\Lambda_3$ -

$\lambda_{3,1}$  (стеклопластик однонаправленный жгутовый РВМП-10-1600-ЭДМ);

$\lambda_{3,2}$  (стеклопластик однонаправленный нитяной ВМПС-6-ЭДТ-10);

$\lambda_{3,2}$  (стеклопластик однонаправленный жгутовый РВМП-10-1200-ЭХД);

в морфоклассе  $\Lambda_5 - \lambda_{5,1}$  раструб гладкий;  $\lambda_{5,4}$  (резьба внутренняя);  $\lambda_{5,4}$  (резьба внешняя).

Синтез конструкторских решений, проверка по массе и технологическим ограничениям показали, что все выделенные элементы морфоклассов  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$ ,  $\Lambda_4$  и  $\Lambda_5$  можно использовать для синтеза конструкторско-технологических решений.

Элементами технологических морфоклассов, допущенные к синтезу конструкторско-технологических решений являются следующие:

в морфоклассе  $\Omega_1 - \omega_{1,1}$  (литье на термопластавтоматах);  $\omega_{1,2}$  (склеивание труб из ПВХ);  $\omega_{1,6}$  (намотка полимерно-смоляной системы с последующим отверждением в термопечи);

в морфоклассе  $\Omega_2 - \omega_{2,1}$  (выкладка и намотка силовой оболочки "сухим" способом с отверждением в термокамерной печи или в автоклаве);

$\omega_{2,2}$  (выкладка и намотка силовой оболочки "мокрым" способом с отверждением в термокамерной печи или в автоклаве);  $\omega_{2,7}$  (выкладка); в морфокласте  $\Omega_4 - \omega_{4,4}$  (формообразование монолитных законцовок в процессе намотки с последующей механической обработкой или с использованием резьбовых знаков);  $\omega_{4,6}$  (формообразование законцовок с наружной резьбой клеємеханическим соединением); в морфокласте  $\Omega_5 - \omega_{5,1}$  (разборные металлические и комбинированные оправки);  $\omega_{5,2}$  (удаление оправки вымыванием, растворением или разрушением);

Для объективного сравнения и ограничения наилучших конструкторско-технологических решений по выбранным критериям, методика совмещенного конструкторско-технологического проектирования предусматривает оптимизацию каждого синтезированного варианта.

Оптимизация намотки нефтесборового тройника сводится к минимизации целевой функции:  $M_{mp}^{\Sigma} = \frac{k_{\phi} \cdot k_{без} \cdot P_{раб} \cdot V \cdot \rho_{\kappa}}{[\sigma_1^+]} + M_{ГО}^{\Sigma} + M_{mex.omx.} \Rightarrow \min,$

где  $k_{\phi}$ - коэффициент учитывающий форму сосуда давления, при наличии функций ограничений:

$$f_1 = 1 - \frac{\sigma_1^+}{|\sigma_1^+|} \geq 0 - \text{условие прочности несущих слоев вдоль волокон};$$

$$f_2 = 1 - \frac{f_{mp}}{|f_{mp}|} \geq 0 - \text{условие укладки ленты на оправку без соскальзывания};$$

$$f_3 = 1 - \frac{\Delta l}{|\Delta l|} \geq 0 - \text{условие укладки ленты по равномерности натяжения};$$

и граничных условий: 1)  $t_n^{\min} < t < t_n^{\max}$  2)  $\beta^{\min} \leq \beta \leq \beta^{np}$ .

#### 4.6. Выбор конструктивно-технологических параметров силовой оболочки нефтепромыслового тройника

Для прямолинейного участка толщина силовой оболочки определяется по формулам:  $h_{oc} = \frac{k_{без} \cdot P_{раб} \cdot R}{2 \cdot [\sigma_1^+]}$ ,  $h_{ок} = \frac{k_{без} \cdot P_{раб} \cdot R}{[\sigma_1^+]}$ ,  $h_{\Sigma} = h_{ок} + h_{oc}$ .



Приняв  $\sigma_1^+ \approx 1000 \text{ МПа}$ ,  $P_{\text{расч.}} = 12 \text{ МПа}$ ,  $R = 50 \text{ мм}$  получаем:  $h = \frac{2 \cdot 50}{2 \cdot 100} + \frac{2 \cdot 50}{100} = 1,5 \text{ мм}$ .

Т.к. в зоне пересечения основной трубы и патрубка напряжения значительно выше, примем для проверочного расчета

Были рассмотрены различные варианты технологии изготовления тройников для сравнения эффективности

#### Вариант НС-КСС-1. Изготовление тройника из тканого материала.

Для анализа НДС в этом случае используем методику разработанную в главе 2.

Характеристики материала силовой оболочки : ткань ВМПС-6+ЭДТ-10

$E_1 = 28000 \text{ МПа}$ ;  $E_2 = 22000 \text{ МПа}$ ;  $\nu_{12} = 0,11$ ;  $E_{12} = E_{13} = E_{23} = 500 \text{ МПа}$ ,

Схема армирования  $(0^\circ)_n$ ,  $h_{\text{сл.}} = 0,125 \text{ мм}$ .

#### Вариант НС-КСС-1а : без усиления в зоне пересечения труб.

$H_{\text{осн. трубы}} = 5 \text{ мм}$ ,  $H_{\text{патрубка}} = 3,5 \text{ мм}$ .

#### Вариант НС-КСС-1б : с усилением в зоне пересечения труб.

$H_{\text{осн. трубы}} = 4 \text{ мм}$ ,  $H_{\text{патрубка}} = 3 \text{ мм}$ ,  $H_{\text{накладки}} = 3 \text{ мм}$ .

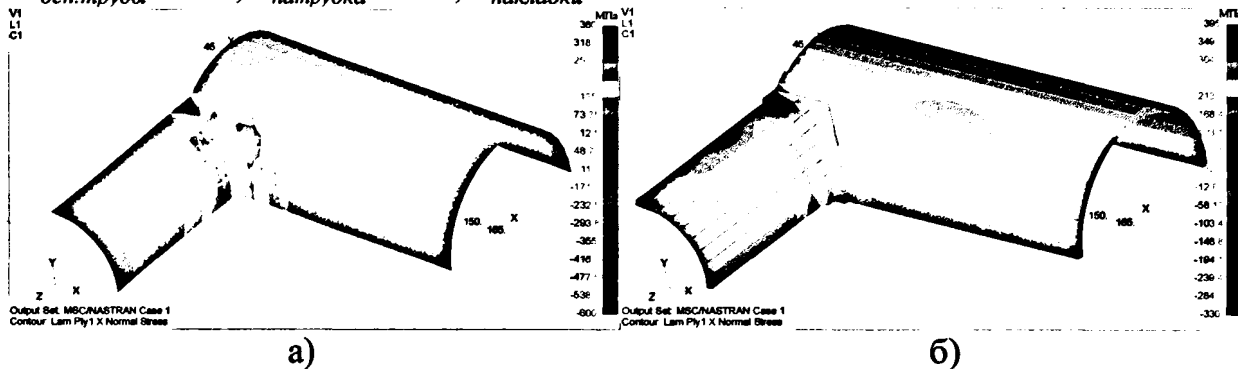


Рис.4.6 Распределение напряжений вдоль волокон слоя 1 в тройнике из тканого материала под действием давления  $p = 120$  ати а) без усиления в зоне пересечения патрубка и основной трубы б) с учетом накладки

На рис. 4.6а, 4.6б представлено распределение напряжений в слое для вариантов НС-КСС-1а и НС-КСС-1б соответственно.

Применение выкладки из ткани оказывается менее эффективно из-за более низких значений удельной прочности, чем при намотке, но при этом можно обеспечить схему армирования близкую к расчетной. Использование усиления в зоне пересечения труб позволяет уменьшить массу силовой оболочки тройника

при равных максимальных напряжениях вдоль волокон в слое.

Вариант НС-КСС-2. Изготовление тройника по схеме изготовления представленной на рис.1.8-1.10.

1. Задание волокон уложенных под углом  $0^\circ$  вдоль патрубка и основной трубы.

Характеристики материала силовой оболочки: ткань ВМПС-6+ЭДТ-10

$E_1=28000$  МПа;  $E_2=22000$  МПа;  $\nu_{12}=0,11$ ;  $E_{12}=E_{13}=E_{23}=500$  МПа,

Схема армирования ( $0^\circ$ )<sub>п</sub>,  $h_{сл.}=0,125$  мм,  $H_\Sigma=2$  мм.

Схема разбиения для четверти тройника на конечные элементы представлена на рис.4.8.

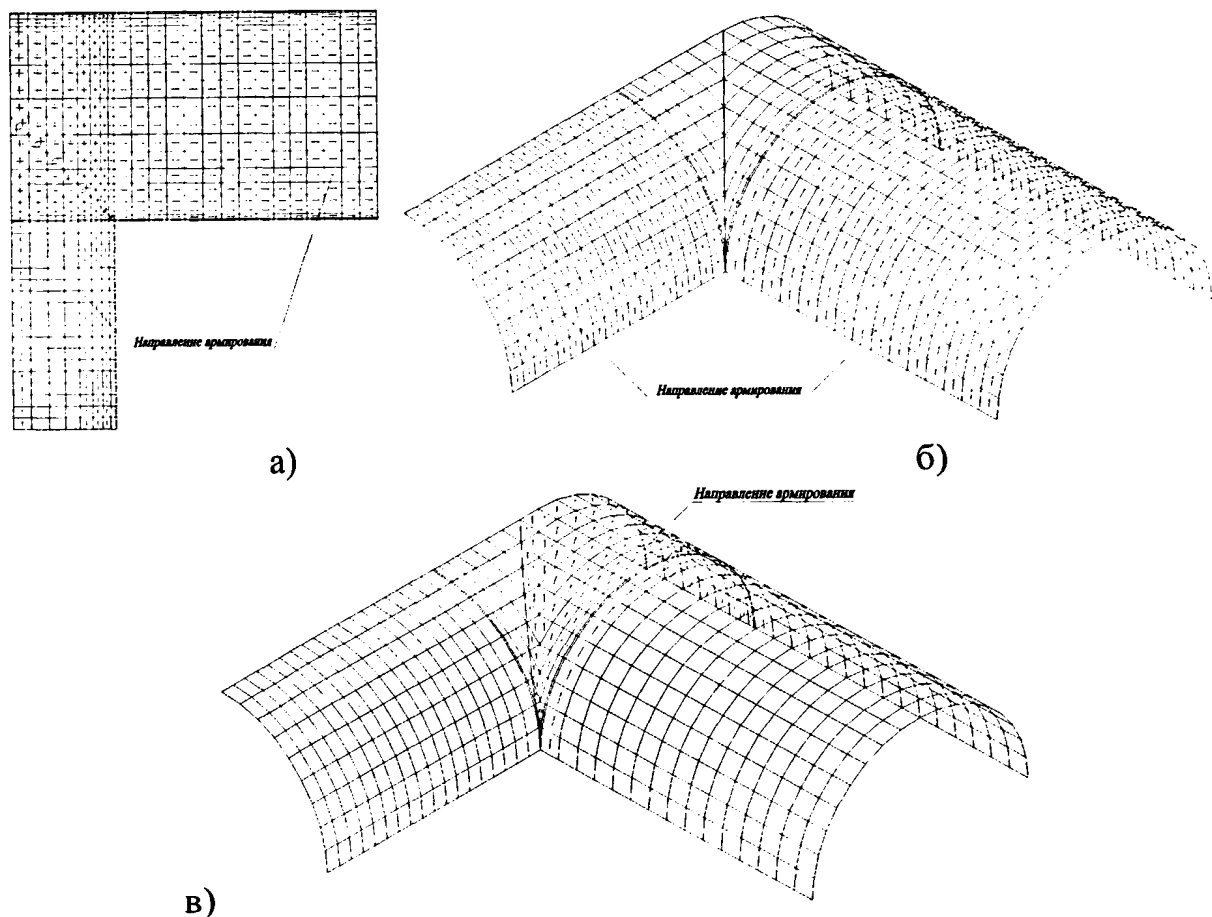


Рис.4.7 а) Разбиение на КЭ слоев тройника, полученных выкладкой

б) Намотка кольцевых слоев. в) Разбиение на КЭ слоев в зоне усиления

2. Характеристики материала силовой оболочки для кольцевых слоев: жгут ВМПС-6+ЭДТ-10,  $E_1=55000$  МПа;  $\nu_{12}=0,11$ ;  $E_{12}=E_{13}=E_{23}=1000$  МПа,

Схема армирования ( $90^\circ$ )<sub>п</sub>,  $h_{сл.}=0,125$  мм,  $H_\Sigma=3$  мм.

Для конечных элементов слоя кольцевой подмотки (рис.4.7б) необходимо также задать расстояние до нижней поверхности  $h=1$  мм.

### 3. Намотка усиления в зоне патрубка и основной трубы.

Характеристики материала силовой оболочки: жгут ВМПС-6+ЭДТ-10

$E_1=55000$  МПа;  $\nu_{12}=0,11$ ;  $E_{12}=E_{13}=E_{23}=1000$  МПа,  $h_{сл.}=0,125$  мм,  $H_{\Sigma}=2$  мм, расстояние до нижней поверхности  $h=2$  мм (рис. 4.10).

На рис. 4.8 представлено распределение напряжений в слое 2 для вариантов НС-КСС-2.

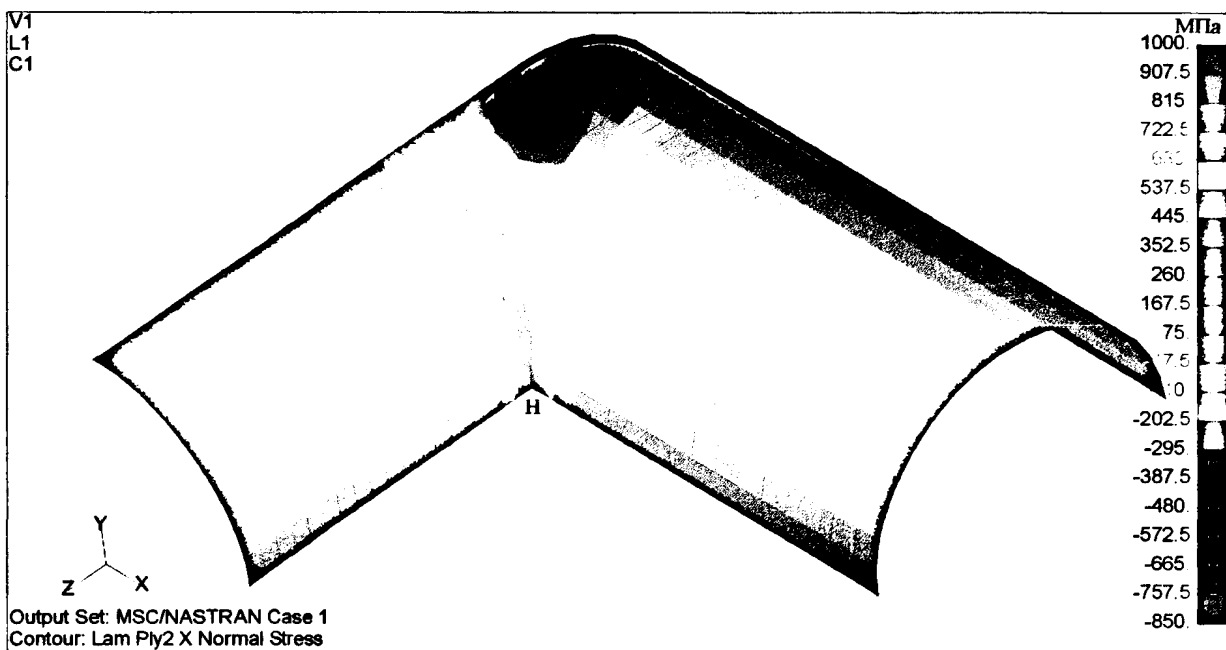


Рис.4.8 Распределение напряжений вдоль волокон слоя 2 в тройнике, изготовленном методом выкладка+намотка от давления  $p=120$  ати.

По результатам анализа схемы изготовления определены необходимость усиления в зоне патрубка для получения равнонапряженной конструкции, в то же время в наиболее нагруженной точке Н получается максимальная толщина конструкции.

Вариант НС-КСС-3 Изготовление тройника методом намотки.

Исключен по ограничению на стоимость технологического оборудования.

Вариант НС-КСС-7 Вариант изготовления тройника с использованием клеевого соединения был исключен по ограничению на максимально допустимое давление.  $P_{max} < p_{раб.} = 6$  МПа.

Параметры нефтепромыслового тройника

КТР тройника	Расчетные параметры					Измеренные параметры		
	$d_{\text{вн.}}$ , мм	$M_{\Sigma}$ , кг	$P_{\text{расч.}}$ , МПа	$\sigma_{\text{расч.}}^{\text{max}}$ , МПа	$\frac{k_{\text{без.}} P_{\text{раб.}} V}{M_{\Sigma}}$ , км	Количество изделий	$P_{\text{разр.}}$ , МПа	$M_{\Sigma}$ , кг
НС-КСС-1а	100 75	2,000	12	500	2,22	10	12	2,100
НС-КСС-1б	100 75	1,800	12	480	2,47	10	12	1,900
НС-КСС-2	100	2,250	12	1290	2,24	10	12	2,300

В таблице 20 приведены расчетные и экспериментальные параметры нефтепромысловых тройников для схем изготовления НС-КСС-1а, НС-КСС-1б и НС-КСС-2.

КТР тройников и методика расчета рекомендованы для внедрения на предприятие АО "РИТЭК" и в учебный процесс.

#### Выводы по главе 4:

1. Даны примеры практического использования разработанной методики совмещенного конструкторско-технологического проектирования тройников для решения задач синтеза и выбора предпочтительных конструкторско-технологических решений криогенных тройников авиационного назначения и тройников внутрипромысловых трубопроводов.
2. Используя методику расчета методом конечных элементов, проведен анализ НДС реально существующих схем изготовления тройников и сравнение расчетных параметров с экспериментальными данными.

### **Заключение и общие выводы по диссертационной работе**

Совокупность разработанных в диссертационной работе моделей конструкторско-технологического проектирования фасонных элементов трубопроводов из КМ, а также практические результаты внедрения позволяют сделать общие выводы по работе, которые изложены ниже.

1. В представленной диссертации решена важная задача, направленная на сокращение сроков конструкторско-технологического проектирования и повышение качества фасонных элементов трубопроводов топливных систем аэрокосмической техники и нефтепроводов.

2. Рассмотрены различные технологии изготовления фасонных элементов трубопроводов из ПКМ. Варианты технологии учтены при формировании морфоклассов технологии и синтезе конструкторско-технологических решений.

3. Исследована возможность использования существующих систем автоматизированного проектирования для автоматизации выпуска КД для синтезированных вариантов.

4. Реализован метод расчета фасонных элементов из КМ, основанный на МКЭ с использованием программы MSC/Nastran. Проведен анализ результатов расчетов и сравнение с результатами экспериментальных исследований.

5. Разработаны структура и состав морфологических блоков и баз данных конструкции и технологии фасонных элементов трубопроводов из ПКМ, на основе декомпозиции изделия, как по элементам конструкции, так и по элементам технологии их изготовления.

6. Используются математические методы морфологического анализа и синтеза, позволяющие осуществлять генерацию вариантов без перебора синтезируемых элементов, уменьшать пространство допустимых решений посредством отсеивания заведомо непригодных вариантов по конструкторским и технологическим ограничениям, качественного и количественного характера, а также по физической несовместимости элементов синтеза между собой.

## Литература

1. И.Черный “Новости космонавтики” №5 2000.
2. Johan Scholliers, Hendrik Van Brussel, Computer-integrated filament winding: computer-integrated design, robotic filament winding and robotic quality control. Composites manufacturing, №1, 1994.
3. Каган Д.Ф. Трубопроводы из пластмасс. – М., Химия, 1980.
4. Технология и оборудование для сварки и склеивания пластмассовых труб в системах газо- и водоснабжения. /АН УССР. Институт электросварки им. Е.О.Патона. – Киев, ИЭС им. Е.О.Патона, 1985. – 98с.
5. Дудко Д.А. и др. Сварка особотонкостенных труб. - М., “Машиностроение”, 1977.
6. Гуревич Д.Ф., Шпаков О.Н. Справочник конструктора трубопроводной арматуры. – Л., “Машиностроение”, 1987. -517с.
7. Буланов И.М. Дисс. докт. техн. наук.
8. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. - М.: МГТУ, 1998.-516с.
9. Буланов И.М., Кузнецов В.М., Нехороших Г.Е. Исследование технологии изготовления металлоуглепластиковых криогенных трубопроводов // Технология: Межотраслевой научно-технический сборник (Миасс). - 1994. - №2. - С. 23-34. - д.с.п.
10. Буланов И.М., Комков М.А., Нехороших Г.Е. Опыт создания криогенных труб из КМ // Технология: Межотраслевой научно-технический сборник (Миасс). –1991. -№4. – С. 31-45. – д.с.п.
- 11.Смыслов В.И. Научно-технические основы создания высокоэффективных корпусов РДТТ из КМ: Автореферат на соискание диссертации доктора технических наук: 05.07.04. - М., 1985. -432с.
- 12.Половников С.П. Разработка и внедрение высокоэффективных КМ, новейших технологических решений и комплексов оборудования: Дисс. докт.техн.наук: 05.02.08. - М., 1982. - 78с. - с.
- 13.Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, И.А. Соловьев и др.; Под общей редакцией В.В. Васильева, Ю.М.

- Тарнопольского. - М.: Машиностроение, 1990. - 512с.
- 14.Цыплаков О.Г. Конструирование изделий из композиционных волокнистых материалов. - Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984. - 140с.
  - 15.Рогинский С.А., Дрейцер В.И. Предварительно пропитанные ровинги - новый материал для изделий, формируемых методом намотки. - М.: ВНИИСПВ, 1975. - 62с.
  - 16.Рогинский С.Л., Канович М.З., Колтунов М.А. Высокопрочные стеклопластики. - М.: Химия, 1979. - 144с.
  - 17.Буланов И.М., Добровольский А.К., Харченко Е.Ф. Оптимизация технологии изготовления изделий из органопластика по структурным параметрам // Применение пластмасс в машиностроении. -1981. -№18. - С. 81-91.
  - 18.Протасов В.Д., Филипченко А.А., Харченко Е.Ф. Влияние структурной неоднородности распределения компонентов в намоточных изделиях на их несущую способность // Проблемы прочности. - 1978. -№4. -С.82-86.
  - 19.Комков М.А., Буланов И.М. Определение конструктивно-технологических параметров оболочек, намотанных из композиционных материалов. - М.: МГТУ, 1992. - 84с.
  20. Булатов Г.А. Пенополиуретаны и их применение на летательных аппаратах. - М.: Машиностроение, 1970. -212с.
  - 21.Термопластичные полиуретаны: Каталог. - Черкассы: НПО "Полимерсинтез", 1989. - 10 с.
  - 22.Вспененные пластические массы. - Черкассы: НПО "Полимерсинтез", 1988. -39 с.
  - 23.Вспененные пластические массы: Сборник трудов НПО "Полимер-синтез". - М.: НИИТЭХИМ, 1990. - 223 с.
  - 24.Сатель Э.А., Летенко В.А., Брянский Г.А. Основы технической подготовки производства и организации труда. - М.: Машгиз, 1959.-243с.
  - 25.Киселев Г.А., Венгеровский Ю.Я. Структура технологической подготовки производства //Стандарты и качество. - 1969. - № 11. -С. 29-35.
  26. Исаченко В.А. Новые принципы подхода и формирования научных исследований в области техники и технологии. // Тр. XIX чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э.Циолковского. - М., 1985. - С. 17-33.

27. Смирнов А.В. Модели и средства концептуального проектирования автоматизированных производственных систем: Дисс. докт. техн. наук: 05.13.16. - С.-Петербург, 1994. - 314 с.
28. Смирнов А.В., Юсупов Р.М. Совмещенное проектирование: необходимость, проблемы внедрения, перспективы. - С.-Петербург: СПИИРАН, 1992. - 37 с.
29. Богомольский М.А. Автоматизированное проектирование авиационных конструкций. Этап предварительного проектирования. - Казань: КАИ, 1982. - 68 с.
30. Резниченко В.И. Оптимизация структуры и технологических параметров силовых элементов конструкции летательных аппаратов из гибридных композиционных материалов на полимерной матрице: Автореферат дисс. канд.техн.наук: 05.07.04. - М., 1983. - 19 с.
31. Тарасов В.Б. Применение методов нечеткой математики на ранних стадиях проектирования динамических систем // Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении. - М.: МВТУ, 1982, - Вып.2. - 57 с.
32. Осин М.И. Методы автоматизированного проектирования летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1984. - 176 с.
33. Прокофьев Г.И. Концепция создания автоматизированной технологии формообразования оптимальных конструкций из волокнистых композиционных материалов. Система автоматизированного формообразования. "Автоматизация и современные технологии". №11 1999. с.18-28.
34. Прокофьев Г.И. Концепция создания автоматизированной технологии формообразования оптимальных конструкций из волокнистых композиционных материалов. Система автоматического формования. "Автоматизация и современные технологии". №8 1999. с.14-25.
35. Прокофьев Г.И. Концепция создания автоматизированной технологии формообразования оптимальных конструкций из волокнистых композиционных материалов. Состояние и проблемы. "Автоматизация и современные технологии". №5 1999. с.18-28.
36. Елькин А.В. Кузнецов А.И. Метод системного подхода при исследовании трубных соединений типа "Раструб". "Автоматизация и современные



- технологии". №10 1999. с.34-37.
37. Куликов Ю.А. Расчет тройникового соединения тонкостенных труб методом конечных элементов. Дисс. канд. техн. наук. 1974.
38. Попов Б.Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами: Учебное пособие. - М.: Изд-во МГТУ, 1993. -294 с.
39. Скопинский В.Н. Напряженное состояние в пересекающихся оболочках: Автореферат на соискание диссертации доктора технических наук: 01.02.03.- М., 1988. -33с.
40. Алешин В. и др. Практическая технология комплексной оценки состояния трубопроводов. // САПР и графика. -№7, 1999.
41. Левяков С.В. Геометрически нелинейный анализ напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук:05.07.03. - Новосибирск, 1995. -18 с.
42. Роганов А.С. Разработка рациональной конструкции и совершенствование технологии изготовления тройников судовых трубопроводов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук:05.08.04. -СПб, 1996. -20 с.
43. MSC/NASTRAN V70.5 QUICK REFERENCE GUIDE, THE MACNEAL-SCHWENDLER CORPORATION, 1998.
44. John M. Lee MSC/NASTRAN Version 69+ Linear Static Analysis User's Guide, 1994.
45. Robert S. Lahey и др., MSC/NASTRAN Version 68 Reference Manual, 1994.
46. Усюкин В.И. Строительная механика конструкций космической техники. – М.: Машиностроение, 1988, – 392с.
47. Баслык К.П., Попов Б.Г. Треугольный шестиузловой конечный элемент с 36 степенями свободы. // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение – М.: МГТУ им. Баумана, 2002, Вып.3 (48) – с. 3-14.
48. Бакулин В.Н., Рассоха А.А.. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов. – М.: Машиностроение, 1987, – 312с.
49. Зенкевич О. Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир,

- 1986, – 318с.
- 50.Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975, – 541с.
- 51.Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
52. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1994. – 381с.
- 53.Егоров В.Н. Расчетные модели комбинированных соединений в конструкциях летательных аппаратов.// Авиационная промышленность. – №8, 1995г.
- 54.Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М: Мир, 1976.-С. 172-215.
- 55.Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
- 56.Микони С.В. Методы и алгоритмы принятия решений. – М.: Машиностроение, 1995. - 186 с.
- 57.Ларичев О.И. Качественные методы принятия решений. – М.: Наука, 1996.-231 с.
- 58.Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. - 256 с.
- 59.Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981. - 559 с.
- 60.Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 204 с.
- 61.Перфильев С.А., Тарасов В.Б. Проблемы синтеза и выбора проектных решений на ранних стадиях разработки динамических систем // Динамика систем и конструкций. – М.: Изд-во МГТУ, 1990. – С.138-156.
62. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
- 63.Добряков А.А. Методы интеллектуализации САПР. – М.: Наука, 1992. – 276с.
- 64.Новиков Б.К. Основы теории принятия решений при проектировании. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1992. – 58 с.
- 65.Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. - М.:

- Радио и связь, 1984. – 288 с.
66. Погребенко Ю.Ф., Кузнецов В.М., Добровольский А.К. Применение метода намотки для изготовления внутренних герметизирующих пленочных оболочек сосудов давления из углепластика // Применение пластмасс в машиностроении: Сборник трудов МВТУ. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. – С. 13-18.
67. Комков М.А., Кузнецов В.М., Погребенко Ю.Ф. О применении некоторых полимерных пленок для намотки герметизирующих оболочек стеклопластиковых сосудов давления // Применение пластмасс в машиностроении: Сб. трудов МВТУ. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984. – С. 21-27.
68. Кузнецов В.М., Саксельцев В.Г. Некоторые механические свойства оболочек из жестких полимерных плёнок // Механика полимерных материалов. – Рига, 1971. – С. 135-139.
69. Пятунин С.П. Применение термоусаживающихся герметизирующих оболочек для ремонта и повышения срока службы судовых трубопроводов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.08.04. – Нижний Новгород, 1998. – 24 с.
70. Буланов И.М., Комков М.А. Применение жестких полимерных пленок в криогенных топливных системах аэрокосмической техники // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1992. - №1. - С. 14-25.
71. Бюллер К.У. Тепло- и термостойкие полимеры. – М.: Химия, 1984. 1056с.
72. Перепечко И.И. Свойства полимеров при низких температурах. – М.: Химия, 1977. – 272 с.
73. Рейтлингер С.А. Проницаемость полимерных материалов. – М.: Химия, 1974. – 272 с.
74. Калачев И.Ф. Разработка конструкции и технологии производства металлополимерных труб для сооружения нефтепромысловых трубопроводов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.15.13. – Уфа, 1998. – 20с.
75. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. / Под ред. Дж. Любина - М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 2 – 448 с.

76. Кожевников И.Г., Новицкий Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник – М: Машиностроение, 1982. – 328 с.
77. Композиционные материалы: Справочник/ Под ред. Д.М. Карпиноса – Киев: Наукова Думка, 1985 – 592 с.
78. Манин В.Н., Громов АН. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. – Л.: Химия, 1980. – 248 с.
79. Вигли Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах. – М.: Мир, 1974. – 196 с.
80. Обухов А.С. Проектирование химического оборудования из стеклопластиков и пластмасс. - М.: Машиностроение, 1995. – 240 с.
81. Буланов И.М., Нехороших Г.Е. Испытание материалов и конструкций из КМ. – М.: МГТУ, 1992. – 42 с.
82. Бунаков В.А. и др. Армированные пластики. М.: Издательство МАИ, 1997г. – 402с.
83. Тапаева С.А., Домород Л.С., Евсеева Л.Е. Теплофизические свойства органопластиков в интервале температур 5-400К. // Пластические массы. – 1984. – №6. – С. 30-32.
84. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. – М.: Химия, 1981. – 232 с.
85. Буров Л.А. Применение полимерных композиционных материалов в криогенном оборудовании. - М.: ЦИНТИХИМ Нефтемаш, 1987. – 50 с.
86. Образцов И.О., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
87. Алексеев К.П. Каюмов Р.А. Механические характеристики органо- и углепластиковых труб, изготовленных методом перекрестной намотки. Механика композиционных материалов и конструкций. Том 4 №4, 1998 стр. 3-20.
88. Рабинович А.Л.. Введение в механику армированных полимеров. М.: “Наука”, 1970 – 482с.
89. Брызгалин Г.И. Проектирование деталей из композиционных материалов волокнистой структуры. - М.: Машиностроение, 1982. – 84с.
90. Буланов И.М., Смыслов В.И., Комков М.А. Сосуды давления из

- композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов. - М.: ЦНИИ информации, 1985. – 308с.
- 91.Калинчев В.А., Буланов И.М. Прогрессивные материалы в машиностроении. - М.: Высшая школа, 1988. – 71 с.
- 92.Прочность материалов элементов конструкции в экстремальных условиях: Справочник - Киев: Наукова Думка, 1980. – 736.с.
- 93.Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединения конструкций из композиционных материалов. - М.: Машиностроение, 1985. – 166 с.
- 94.Царахов Ю.С. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов. - М.: МАТИ, 1980. – 80 с.
- 95.Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов / Под ред. В.В. Васильева. – М.: МАИ, 1985. – 218 с.
- 96.Власов П.В. Методы соединения труб из стеклопластиков и соединительные элементы. – М.: МНТИ, 1969. – 112 с.
- 97.Аксельрад Э.Л., Ильин В.П. Расчет трубопроводов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 240 с.
- 98.Сёмин М.И., Д.В.Стреляев., Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность. – Москва, ЛАТМЕС, 1996.
- 99.Колесников Л.П. и др. Соединения трубопроводов. Справочник: В 2 т. – М., Издательство стандартов, 1988.
100. Буланов И.М. Клеевые соединения. // Энциклопедия машиностроения. - М.: Машиностроение, 1995. - С. 227-245.
101. Волошин А.А. Расчет и конструирование фланцевых соединений. М.:Машиностроение, 1972 – 136с.