

1. Технологическая часть

Введение

В данной части дипломного проекта рассматривается технологический процесс изготовления заряда из смесового твердого ракетного топлива, прочно скрепленного с корпусом РДТТ.

Смесевые твердые топлива являются ярко выраженными гетерогенными, многофазными взрывчатыми системами, представляющими собой смесь, как правило, неорганического окислителя, органического высокомолекулярного горючего-связующего и содержащие специальные добавки (энергетические, эксплуатационные, технологические). По своей структуре СТРТ – высоконаполненные (до 95%) композиционные материалы, в полимерной матрице которых равномерно распределены мелкодисперсные окислитель, металлическое (металлосодержащее) горючее и другие компоненты.

1.1. Схема технологического процесса изготовления заряда из СТРТ

В конструкторской части дипломного проекта была выбрана следующая конфигурация заряда: по оси расположен заряд вспомогательного топлива («ведущий») пренебрежимо малого диаметра, что позволяет торцевой поверхности основного заряда («ведомый») при выгорании глухой вершины конуса не разгораться по сферической поверхности.

Для «ведущего» заряда выбрано топливо марки ПХН – 2М, для «ведомого» выбрано топливо марки ПХА – 4М.

Характеристики комбинации представлены в таблице 1.1 и таблице 1.2

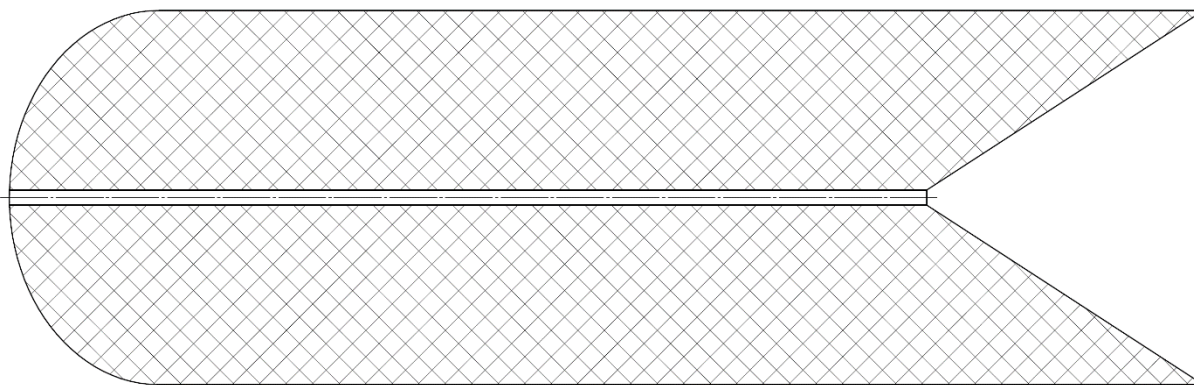


Рисунок 1.1 – Геометрия заряда

Таблица 1.1 – Характеристики топлива ПХН – 2М

Состав	Окислитель	перхлорат нитрона, %	30
	Горючее	порошкообразный алюминий, %	60
	ГСВ	поливинилхлорид, %	10
Условная химическая формула			$C_{5,268}H_{4,800}O_{12,375}N_{2,062}Cl_{3,663}Al_{22,237}$
Энтальпия образования H_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			-64,39
Закон горения			$U = 14,5 \cdot \left(\frac{p}{98066,5} \right)^{0.19}$
Плотность топлива ρ_t , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$			2430
Теплопроводность c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$			$0,932 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$			4,5
Коэффициент линейного расширения α , $\frac{1}{K}$			$2 \cdot 10^{-4}$
Минимальное давление устойчивого горения p , кПа			0,7
Эксплуатационный интервал температур T, K			[240;293]

Таблица 1.2 – Характеристики топлива ПХА – 4М

Состав	Окислитель	перхлорат аммония, %	35
	Горючее	порошкообразный алюминий, %	20
	ГСВ	нитразол, %	45
Условная химическая формула			$C_{5,213}H_{24,948}O_{28,408}N_{7,428}Cl_{2,979}Al_{7,413}$
Энтальпия образования $H_{\pi}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$			–2034
Закон горения			$U = 6,49 \cdot \left(\frac{p}{98066,5} \right)^{0.24}$
Плотность топлива $\rho_{\pi}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$			1800
Теплопроводность $c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$			$1,084 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$			0,94
Коэффициент линейного расширения $\alpha, \frac{1}{K}$			$3,4 \cdot 10^{-4}$
Минимальное давление устойчивого горения $p, \text{кПа}$			30
Эксплуатационный интервал температур T, K			[220;320]

Рассматриваемый состав, как и другие высокоэнергетические СТРТ крупногабаритных зарядов представляют собой высоконаполненную гетерогенную композицию, содержащую до 90% твердого наполнителя различной химической природы, в том числе высокочувствительное взрывчатое вещество. В этой связи смешение топливной массы с целью

обеспечения безопасности, необходимой воспроизводимости состава и свойств по всему объему заряда проводят в несколько приемов, предварительно получая частные смеси из нескольких компонентов.

Условно принципиальная схема изготовления заряда СТРТ представлена на рисунке 1.2.

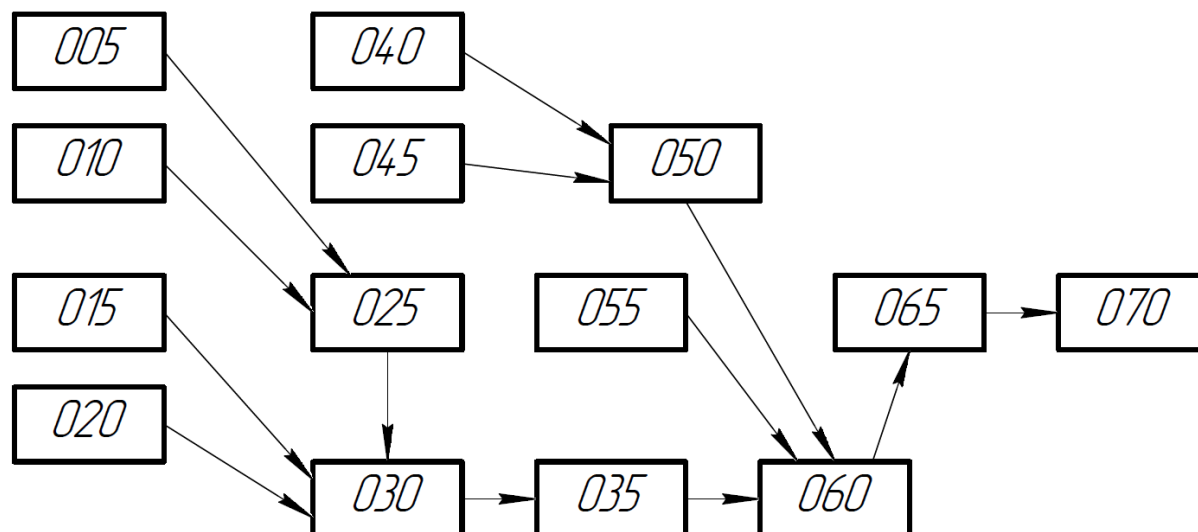


Рисунок 1.2 – Схема изготовления зарядов СТРТ

Основные технологические операции изготовления заряда из СТРТ представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные технологические операции

№	Наименование операции
005	Приготовление РСПК для «ведомого» топлива
010	Приготовление ССД для «ведомого» топлива
015	Подготовка корпуса двигателя
020	Подготовка технологической оснастки
025	Смешение топливной массы «ведомого» заряда
030	Заполнение корпуса двигателя
035	Отверждение и распрессовка заряда
040	Приготовление РСПК для «ведущего» топлива
045	Приготовление ССД для «ведущего» топлива
050	Смешение топливной массы «ведущего» заряда
055	Подготовка технологической оснастки
060	Заполнение корпуса двигателя
065	Отверждение и распрессовка заряда
070	Контроль качества и укупорка

1.2. Разработка операционного технологического процесса

Таблица 1.4 – Операционная карта изготовления заряда СТРТ

№	Содержание операции	Оборудование
Операция 005. Приготовление РСПК для «ведомого» топлива		
1	Измельчение крупной фракции ПХА	Дробильно-протирочный аппарат
2	Сушка ПХА	Сушилка с «кипящим слоем»
3	Измельчение крупной фракции ПХА	Струйно-вихревая мельница
4	Дозирование мелкой фракции ПХА	Накопитель мелкой фракции
5	Загрузка мелкой фракции ПХА в смеситель	Смеситель С-5
Операция 010. Приготовление ССД для «ведомого» топлива		
1	Дозирование пластификатора	Дозатор
2	Смешение связующего с пластификатором	Планетарный смеситель
3	Загрузка порошкообразного алюминия	Вибро-шнековый дозатор
4	Перемешивание массы	Планетарный смеситель
5	Отбор массы для анализа	—
Операция 015. Подготовка корпуса двигателя		
1	Входной контроль	—
2	Нанесение раствора на основе синтетического каучука	Штанга распыления ЗКС
3	Отверждение	Кабина термостатирования
Операция 020. Подготовка технологической оснастки		
1	Входной контроль	—

2	Установка корпуса на стапель	Кран-балка
3	Обработка иглы обезжиривающим раствором	—
4	Установка иглы на корпусе	Кран-балка
5	Проверка герметичности	Компрессор, датчик давления
Операция 025. Смешение топливной массы «ведомого» заряда		
1	Загрузка РСПК из контейнера смесителя	Смеситель непрерывного действия
2	Загрузка ССД	Смеситель непрерывного действия
3	Перемешивание	Смеситель непрерывного действия
4	Перемешивание всей композиции в вакууме	Вакуумный смеситель
Операция 030. Заполнение корпуса двигателя		
1	Проверка температуры и влажности в помещении	Термометр, гигрометр
2	Проверка герметичности системы	Датчик давления
3	Подача топливной массы в корпус	Напорная труба
4	Отсоединение смесителя и экструдера от сборки	—
Операция 035. Отверждение и распрессовка заряда		
1	Подготовка полимеризационной кабины	Термометр, гигрометр
2	Помещение корпуса в полимеризационную кабину	Кран-балка
3	Установка датчиков	—
4	Термостатирование заряда	Полимеризационная кабина

5	Ступенчатое охлаждение изделия	Полимеризационная кабина
6	Установка корпуса на стапель	Кран-балка
7	Извлечение иглы	Кран-балка
Операция 040. Приготовление РСПК для «ведущего» топлива		
1	Измельчение крупной фракции ПХН	Дробильно-протирочный аппарат
2	Сушка ПХН	Сушилка с «кипящим слоем»
3	Измельчение крупной фракции ПХН	Струйно-вихревая мельница
4	Дозирование мелкой фракции ПХН	Накопитель мелкой фракции
5	Загрузка мелкой фракции ПХН в смеситель	Смеситель С-5
Операция 045. Приготовление ССД для «ведущего» топлива		
1	Дозирование пластификатора	Дозатор
2	Смешение связующего с пластификатором	Планетарный смеситель
3	Загрузка порошкообразного алюминия	Вибро-шнековый дозатор
4	Перемешивание массы	Планетарный смеситель
5	Отбор массы для анализа	—
Операция 050. Смешение топливной массы «ведущего» заряда		
1	Загрузка РСПК из контейнера смесителя	Смеситель непрерывного действия
2	Загрузка ССД	Смеситель непрерывного действия
3	Перемешивание	Смеситель непрерывного действия

4	Перемешивание всей композиции в вакууме	Вакуумный смеситель
Операция 055. Подготовка технологической оснастки		
1	Входной контроль	—
2	Установка корпуса на стапель	Кран-балка
3	Обработка иглы обезжиривающим раствором	—
4	Установка иглы на корпусе	Кран-балка
5	Проверка герметичности	Компрессор, датчик давления
Операция 060. Заполнение корпуса двигателя		
1	Проверка температуры и влажности в помещении	Термометр, гигрометр
2	Проверка герметичности системы	Датчик давления
3	Подача топливной массы в корпус	Напорная труба
4	Отсоединение смесителя и экструдера от сборки	—
Операция 065. Отверждение и распрессовка заряда		
1	Подготовка полимеризационной кабины	Термометр, гигрометр
2	Помещение корпуса в полимеризационную кабину	Кран-балка
3	Установка датчиков	—
4	Термостатирование заряда	Полимеризационная кабина
5	Ступенчатое охлаждение изделия	Полимеризационная кабина
6	Установка корпуса на стапель	Кран-балка
7	Извлечение иглы	Кран-балка
Операция 070. Контроль качества и укупорка		

1	Выходной контроль размеров	—
2	Установка снаряженного корпуса на дефектоскоп	γ -дефектоскоп
3	Проведение дефектоскопии	γ -дефектоскоп
4	Контрольное взвешивание	Весы
5	Укупорка	—

1.3. Описание операций

Операция 005. Приготовление рабочей смеси порошкообразных компонентов (РСПК)

Применительно к рассматриваемому составу в РСПК входят различные фракции перхлората аммония и перхлората нитрония, отличающиеся средним диаметром частиц и удельной поверхностью.

В общем случае применение полифракционного наполнителя по сравнению с монофракционным позволяет улучшить реологические характеристики топливной массы при постоянной объемной доле наполнителя или увеличить объемную долю наполнителя при сохранении уровня реологических характеристик.

Крупный ПХА поступает на производство зарядов готовым, а мелкий – получают непосредственно на производстве путем измельчения крупного до требуемой величины удельной поверхности перед началом изготовления топливной массы.

Из дробильно-протирачного аппарата ПХА системой транспортеров подается в сушильный агрегат. Используют сушилку с псевдоожиженным («кипящим») слоем. Она имеет корытообразный поддон, разделенный вертикальными перегородками на несколько секций. В нижней части расположена воздухораспределительная решетка, на которой находится слой ПХА, под решетку (в каждую секцию индивидуально) подается горячий (100-130 °С) воздух. Скорость подачи воздуха такова, что он не уносит частицы

ПХА, а переводит продукт во взвешенное состояние. Сушка в стационарном «кипящем» слое является одним из эффективных средств интенсификации этого процесса, так как каждая частица имеет тесный контакт с теплоносителем. Вертикальные перегородки имеют зазоры у противоположных стенок рабочей камеры, поэтому ПХА перемещается к загрузочной зоне зигзагообразно.

Рабочая фракция с кондиционными размерами частиц направляется реверсивным шнеком и системой транспортеров в накопительную емкость. Частицы поступают в струйно-вентиляционную установку («мельницу») для измельчения.

В струйной мельнице измельчение достигается за счет взаимного соударения частиц, разгоняемых до 100-200 м/с. К достоинствам этих устройств следует отнести возможность тонкого и сверхтонкого сухого помола, отсутствие вращающихся деталей, незначительное загрязнение продуктов измельчения. Вместе с тем струйные мельницы отличаются большими удельными энергозатратами, а также требуют установки после себя громоздкой системы пылеулавливания.

Степень дисперсности регулируется углом поворота лопаток и определенной высотой отбойного конуса. Настройка установки на нужную производительность осуществляется изменением числа оборотов шнека.

Воздух с мелкими частицами выходит из сепаратора через верхний патрубок и направляется в четыре циклона. В них ПХА отделяется от воздуха и поступает в приемный бункер, где выгружается с помощью шлюзового затвора и системой транспортеров в накопитель мелкой рабочей фракции.

Воздух из циклона проходит фильтрацию и воздуходувкой возвращается в разгонные устройства. Таким образом, струйная мельница имеет замкнутый цикл по воздуху.

Набранные в заданных соотношениях навески фракций загружаются в передвижной контейнер-смеситель, в него же дозируются негорючие

порошкообразные компоненты, далее производится смешение всех указанных компонентов и их транспортировка в здание получения топливной массы.

Смешение осуществляется при вращении контейнера, который представляет собой аппарат периодического действия типа «пьяной» бочки. При периодическом ведении процесса смешения, во-первых, можно получить точное соотношение между компонентами смеси (при их загрузке в смеситель по массе), а, во-вторых, при относительно большом числе компонентов их дозирование в смеситель затруднено.

Операция 010. Приготовление смеси связующего с добавками (ССД)

Назначение этой технологической фазы производства СТРТ заключается в смешении связующего с пластификатором, порошкообразным алюминием, отверждающими добавками; при этом осуществляется вакуумирование смеси для удаления воздуха и летучих веществ.

Поскольку порошкообразный алюминий активен по отношению к воде, предварительно проводится процесс его пассивации и гидрофобизации в смесительных реакторах. Процесс пассивации порошкообразного алюминия заключается в создании на поверхности частиц защитного слоя из молекул пассивирующего вещества с целью компенсации химической активности поверхности. Процесс гидрофобизации порошкообразного алюминия заключается в образовании на поверхности частиц пленки гидрофобизирующего вещества, которая не смачивается водой.

Операция 015. Подготовка корпуса двигателя

Данная стадия технологического процесса производства заключается в нанесении защитно-крепящего слоя (ЗКС) на основе синтетических каучуков (СКН, СКЭПТ и др.) на внутреннюю поверхность корпуса РДТТ для обеспечения адгезии с зарядом СТРТ, теплозащиты и эрозионной стойкости материала ТЗП. Крепящий состав через насос подается в штангу распыления ЗКС. При нанесении корпус приводят во вращение вокруг своей оси. Отверждение ЗКС происходит при повышенных температурах путем термостатирования в специальных кабинах при температуре 50-60 °С.

Регламентируется срок и условия хранения подготовленного корпуса до заполнения топливной массой (~ 10-15 суток).

Операция 020. Подготовка технологической оснастки

В технологическую (формующую) оснастку входят следующие основные элементы: формующая игла, узел силового крепления иглы, узел ввода, система поддавливания и отсечки топливной массы после заполнения. Сущность подготовки заключается в том, что элементы, соприкасающиеся с топливной массой после заполнения корпуса, покрывают антиадгезионным слоем с тем, чтобы после отверждения заряда эти формующие элементы можно было безопасно извлечь (распрессовать заряд). Как правило, для покрытия используют кремнийорганические (силиконовые) каучуки в виде раствора.

Операция 025. Смешение топливной массы

Цель смешения – равномерное распределение компонентов по объему, получение однородной по химическому составу массы, достижение стабильности ее характеристик.

Для получения и переработки топливных масс методом литья под давлением используют смеситель непрерывного действия (СНД). СНД состоит из предварительного смесителя с бункером, имеющий загрузочный люк для подачи компонентов или предварительно подготовленной топливной композиции. В нижней части корпуса находится продольное окно, соединяющееся с цилиндрическим каналом, в котором располагается шнек предварительного смесителя; в нем топливная масса подвергается интенсивной дополнительной механической обработке. При этом топливная масса передвигается вдоль оси шнека, а затем через решетку, установленную в конце канала, подается в вакуумную камеру и вакуумный смеситель. В них создается разрежение, благодаря чему из топливной массы удаляется воздух и другие газообразные вещества. Напорный экструдер аналогичен предварительному смесителю, но отличается размерами. Патрубок экструдера заканчивается напорной трубой, к которой подсоединяется корпус двигателя.

Таким образом, в аппарате СНД совмещаются операции смешения компонентов и ее нагнетания в корпус двигателя.

Операция 035. Отверждение и распрессовка заряда

Отверждение определяет эффективность всего технологического процесса, так как составляет около 80% общего времени изготовления зарядов СТРТ.

На стадии отверждения (полимеризации) топливной массы завершается формирование структуры и физико-механических свойств зарядов в результате протекания химических реакций и различных физико-химических процессов.

При полимеризации происходят различные химические превращения и физико-химические процессы при повышенной температуре, в результате которых осуществляется «сшивка» молекулярных цепей связующего и образуется единый пространственный каркас сплошной полимерной матрицы, содержащей высококонцентрированную дисперсную фазу наполнителей.

Отверждение заряда происходит в специальных кабинах, которые представляет собой бетонированный колодец круглого сечения, в котором регулируют и контролируют температуру воздуха при термостатировании.

После окончания процесса отверждения изделие охлаждают в тех же кабинах подачей воздуха определенной температуры. Процесс охлаждения крупных изделий продолжается в течении нескольких суток.

На фазе распрессовки удаляется формирующая технологическая оснастка из заряда. При распрессовке выполняются следующие операции: разборка соединительных элементов, снятие крышки, извлечение технологической иглы.

Для распрессовки зарядов применяют следующее оборудование: гидравлические пресс-станции, подъемно-перегрузочные устройства.

Операция 070. Контроль качества и укупорка

Контроль качества зарядов включает проверку химического состава топлива, его механические характеристики и скорости горения, прочности

скрепления топлива со стенками корпуса двигателя и сплошности этого скрепления, монолитности заряда, его геометрических и весовых характеристик.

Контроль для обнаружения дефектов в виде посторонних включений, трещин, разнотности и других дефектов осуществляют методом теневой ультразвуковой дефектоскопии.

Метод основан на особенностях распространения ультразвуковых упругих колебаний (УЗК) с частотами 18-22 кГц в твердых средах и на границе раздела сред.

Генератор подает электрические колебания на пьезоэлемент излучающего преобразователя, который генерирует ультразвуковые колебания. Последние проходят через изделие и попадают на пьезоэлемент приемного преобразователя, откуда электрические колебания поступают в приемник. Здесь поступающие электрические сигналы усиливаются и преобразуются в ток регистрирующего устройства. В случае, если луч УЗК частично или полностью перекрывается дефектом, интенсивность колебаний в той или иной степени ослабевает, и регистрирующее устройство на дефектограмме дает отметку о наличии дефекта в объеме изделия.

После операции контроля качества производится укупорка корпуса.

1.4. Расчет шнекового экструдера

На данном этапе необходимо произвести расчет и разработать чертеж общего вида.

Схема одношнекового экструдера представлена на рисунке 1.3 [1]. Топливная масса из бункера 1 поступает в корпус 3, где захватывается вращающимся шнеком 2 и транспортируется к головке 6. При этом рабочее тело экструдера в зоне I (зона питания) уплотняется, в зоне II (зона сжатия) происходит его сжатие, а в зоне III (зона дозирования) рабочее тело гомогенизируется, после чего выдавливается в головку 6 через формирующую решетку 5. Для обеспечения требуемого теплового режима и условий транспортирования в корпусе могут быть предусмотрены каналы теплоносителя 4.

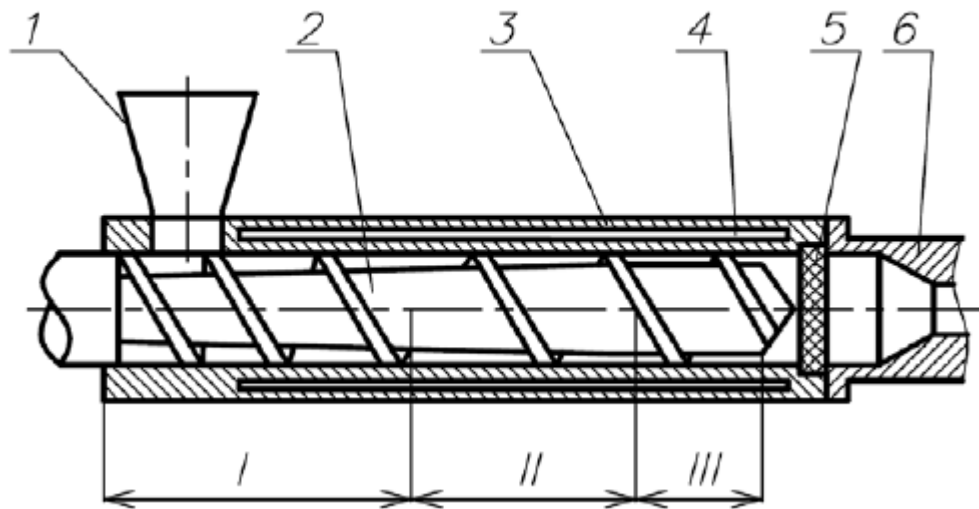


Рисунок 1.3 – Шнековый экструдер

На рисунке 1.4 показана схема шнека с переменной глубиной нарезки и указаны основные геометрические параметры.

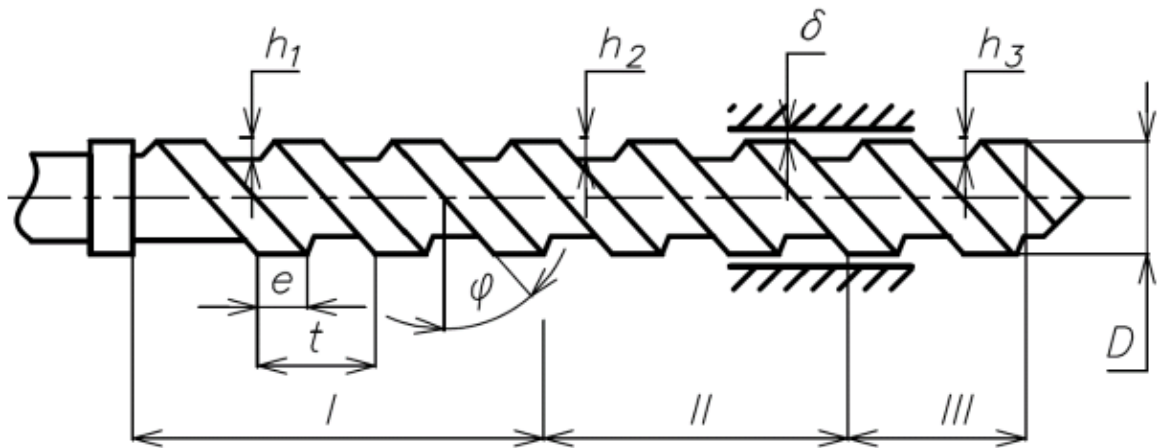


Рисунок 1.4 – Схема шнека с переменной глубиной нарезки

Основные геометрические параметры:

1. диаметр D ;
2. длина L ;
3. шаг винтовой нарезки t ;
4. глубина канала по зонам (глубина нарезки) h ;
5. ширина ребра e ;
6. величина зазора между ребром шнека и корпусом δ ;
7. угол подъема винтовой линии нарезки шнека φ ;
8. число заходов нарезки шнека обычно принимается $\lambda = 1$.

В качестве исходного параметра для расчета экструдера принимается его производительность.

$$Q = 9 \text{ м}^3 / \text{ч} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Для известной производительности экструдера можно определить диаметр шнека:

$$D = 4,65 \cdot (1 + k_{\text{п}})^{0,4} \cdot Q^{0,4} = 4,65 \cdot (1 + 0,1)^{0,4} \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^{0,4} = 0,44 \text{ м},$$

где Q – объемная производительность, D – диаметр шнека, $k_{\text{п}}=0,15$ – коэффициент, учитывающий утечки и осевые перетечки рабочего тела.

Округляем до ближайшего значения диаметра в большую сторону в соответствии с ГОСТ – 14773.

Тогда принимаем значение $D_{\text{ш}}=450 \text{ мм}=0,45 \text{ м}$.

Угол наклона винтовой поверхности:

$$\varphi = \text{atg}\left(\frac{t}{\pi \cdot D_{\text{ш}}}\right) = \text{atg}\left(\frac{0,45}{\pi \cdot 0,45}\right) = 0,308 \text{ рад.}$$

Средние глубины винтового канала шнека в каждой из зон:

- в зоне питания

$$h_1 = 0,12 \cdot D_{\text{ш}} = 0,12 \cdot 0,45 = 0,054 \text{ м,}$$

- в зоне дозирования

$$h_3 = 0,5 \left[D_{\text{ш}} - \sqrt{D_{\text{ш}}^2 - \frac{4h_1}{3}(D_{\text{ш}} - h_1)} \right],$$

$$h_3 = 0,5 \cdot [0,45 - \sqrt{0,45^2 - \frac{4 \cdot 0,054}{3}(0,45 - 0,054)}] = 0,016 \text{ м,}$$

- в зоне сжатия

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{2} = 0,054 - \frac{0,054 - 0,016}{2} = 0,035 \text{ м.}$$

Ширина ребра и величина радиального зазора:

$$e = 0,08 \cdot D_{\text{ш}} = 0,08 \cdot 0,45 = 0,036 \text{ м,}$$

$$\delta = 3 \cdot \frac{D_{\text{ш}}}{1000} = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Критическая частота вращения шнека:

$$n_{\text{кр}} = \frac{0,75}{\sqrt{D_{\text{ш}}}} = \frac{0,75}{\sqrt{0,45}} = 1,118 \text{ с}^{-1},$$

Рабочая частота вращения шнека:

$$n_{\text{р}} = 0,5 \cdot n_{\text{кр}} = 0,5 \cdot 1,118 = 0,559 \text{ с}^{-1}.$$

Для течения в экструдере средняя угловая скорость сдвига:

$$\gamma = \frac{\pi \cdot D \cdot n_p}{(0,4 \cdot h_1 + 0,4 \cdot h_2 + 0,2 \cdot h_3)},$$

$$\gamma = \frac{\pi \cdot 0,45 \cdot 0,559}{(0,4 \cdot 0,054 + 0,4 \cdot 0,035 + 0,2 \cdot 0,016)} = 20,276 \text{ рад/с}.$$

Коэффициент динамической вязкости для неньютоновской жидкости:

$$\mu = 10^{a \cdot \lg(\gamma) + b} = 10^{(-0,56) \cdot \lg(20,276) + 4,1} = 2333,926 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

Длина шнека:

$$L = \frac{p_m \cdot (0,4 \cdot h_1 + 0,4 \cdot h_2 + 0,2 \cdot h_3)^2 \cdot \text{tg} \varphi}{0,6 \cdot \pi \cdot D \cdot \mu \cdot n_p},$$

$$L = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot (0,4 \cdot 0,054 + 0,4 \cdot 0,035 + 0,2 \cdot 0,016)^2 \cdot \text{tg}(0,308)}{0,6 \cdot \pi \cdot 0,45 \cdot 2,334 \cdot 10^3 \cdot 0,559} = 2,185 \text{ м}.$$

Длина каждой зоны:

- зона питания $L_1 = 0,4 \cdot L = 0,4 \cdot 2,185 = 0,874 \text{ м};$
- зона сжатия $L_2 = 0,4 \cdot L = 0,4 \cdot 2,185 = 0,874 \text{ м}$
- зона дозирования $L_3 = 0,2 \cdot L = 0,2 \cdot 2,185 = 0,437 \text{ м}.$

Экструдер установлен в корпусе с помощью двух подшипников шариковых радиальных однорядных (ГОСТ 8338-75) и одного подшипника упорного шарикового (ГОСТ 7872-89).

Максимальное осевое усилие P_0 на шнек определяется по следующей формуле:

$$P_0 = \frac{\pi \cdot p_M \cdot D_{\text{ш}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,45^2}{4} = 795,216 \text{ кН}.$$

Принимаем, что осевое усилие на упорном подшипнике F_0 равно P_0 .

Усилие поперечного нагружения:

$$P_r = (0,04 \dots 0,12) \cdot P_0 = 0,04 \cdot 795,216 = 31,808 \text{ кН}.$$

Поперечное усилие сосредоточено в области бункера, где осуществляется загрузка топливной массы. Из соотношения моментов сил и

суммы сил на ось OX определяются поперечные нагрузки на каждый из радиальных подшипников F_y .

$$P_r \cdot l - F_{y2} \cdot 3l = 0,$$

$$F_{y2} = \frac{P_r \cdot l}{3l} = \frac{31,808}{3} = 10,603 \text{ кН},$$

$$F_{y1} = F_{y2} + P_r = 10,603 + 31,808 = 42,411 \text{ кН}.$$

Выбор подшипников осуществляется из предположения, что максимальная осевая (для упорного подшипника) и поперечная (для радиального подшипника) нагрузки F_o и F_y соответственно не должны превышать 50...70 % статической грузоподъемности подшипников C_0 [6].

Тогда, выбираем следующие подшипники в соответствии с ГОСТ 8338-75 и ГОСТ 7872-89:

$d_1=460$ мм, $F_{y1}=42,411$ кН, $C_{r1}=300$ кН, обозначение подшипника 1000892;

$d_2=380$ мм, $F_{y2}=10,603$ кН, $C_{r2}=247$ кН, обозначение подшипника 1000876;

$d_3=500$ мм, $F_o=795,216$ кН, $C_{r3}=1020$ кН, обозначение подшипника 82/500Н;

Ресурс работы подшипников до наступления момента, когда вероятность отказа становится более 10 %:

$$L_{10_1} = \left(\frac{C_{r1}}{(X \cdot K_V \cdot F_o + Y \cdot F_{y1}) \cdot K_B \cdot K_T} \right)^3 = \left(\frac{300}{(0 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 42,411) \cdot 2,5 \cdot 1} \right)^3 = 22,7 \text{ млн.об.},$$

$$L_{10_2} = \left(\frac{C_{r2}}{(X \cdot K_V \cdot F_o + Y \cdot F_{y2}) \cdot K_B \cdot K_T} \right)^3 = \left(\frac{247}{(0 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 10,603) \cdot 2,5 \cdot 1} \right)^3 = 809 \text{ млн.об.},$$

$$L_{10_3} = \left(\frac{C_{r3}}{(X \cdot K_V \cdot F_o + Y \cdot F_y) \cdot K_B \cdot K_T} \right)^3 = \left(\frac{1020}{(1 \cdot 1 \cdot 795,216 + 1 \cdot 0) \cdot 2,5 \cdot 1} \right)^3 = 0,135 \text{ млн.об.}$$

где C_r – динамическая грузоподъемность подшипника, X – коэффициент осевой динамической нагрузки, Y – коэффициент радиальной динамической

нагрузки, K_V – коэффициент вращения, K_B – коэффициент динамичности нагрузки, K_T – температурный коэффициент.

Принимаем:

- для радиальных подшипников $Y = 1$; $X = 0$; $K_V = 1$;
- для упорных подшипников $Y = 0$; $X = 1$.

Учитывая кратковременные перегрузки при работе экструдера до 300 % рекомендовано принимать $K_B = 2,5 \dots 3$. Температурный коэффициент выбирается с учетом допустимого нагрева корпуса подшипника при его работе согласно таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Значения температурного коэффициента

Рабочая температура, °С	K_T	Рабочая температура, °С	K_T
<100	1	175...200	1,25
100...125	1,05	200...225	1,35
125...150	1,10	225...250	1,40