

*Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАМИ)*

М.Б. Генералов

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПРОИЗВОДСТВА ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ



Москва
2013

УДК 66.27
ББК 31.35
Г 34

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *С.Е. Малинин*,
зам. генерального директора
ОАО «Центральное научно-
конструкторское бюро»;
д-р техн. наук, проф. *В.И. Сарабьев*,
начальник отдела ОАО
«НИИ прикладной химии»

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области химической технологии и биотехнологии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий»

Генералов М.Б.

Г 34 Основные процессы и аппараты производства твердого ракетного топлива: учеб. пособие. – М.: Ун-т машиностроения, 2013. – 232 с.
ISBN 978-5-94099-113-7

Рассмотрены основные процессы и аппараты производства твердых ракетных топлив, методы расчета технологических параметров и элементов конструкций используемого оборудования. Особое внимание уделено вопросам автоматизации производства, безопасности технологического оборудования и средствам пожаро- и взрывозащиты, а также экологическим проблемам.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 24.07.06 – *Автоматизированное производство химических предприятий* и 18.05.01 – *Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий* (специализация – *Автоматизированное производство химических предприятий*)

УДК 66.27
ББК 31.35

ISBN 978-5-94099-113-7

© Генералов М.Б., 2013

©Макарова Ю.В., дизайн обложки, 2013

© Университет машиностроения, 2013

Оглавление

Введение.....	10
Глава 1. Общая характеристика ракетных топлив и требования к ним	14
1.1. Введение.....	14
1.2. Общая характеристика ракетных топлив.....	15
1.3. Требования к ракетным топливам.....	17
1.3.1. Энергетические характеристики ракетных топлив.....	18
1.3.2. Эксплуатационные требования.....	19
1.3.3. Производственно-экономические требования...	20
Контрольные вопросы.....	20
Глава 2. Классификация твердых ракетных топлив и их характеристика.....	21
2.1. Общие сведения о твердых ракетных топливах.....	21
2.2. Основные стадии получения и переработки топлив....	26
Контрольные вопросы.....	28
Глава 3. Получение баллиститных твердых ракетных топлив.....	29
3.1. Исторические этапы производства баллиститных ракетных топлив.....	29
3.2. Состав топлив.....	30
3.3. Основные сведения о технологии производства баллиститных топлив.....	32
3.3.1. Подготовка компонентов баллиститных топлив...	32
3.3.2. Дозирование компонентов.....	34
3.3.3. Приготовление суспензий порошкообразных компонентов.....	34
3.3.4. Смешение компонентов топлива.....	37
3.4. Физико-химические особенности процесса получения БТРТ.....	38
Контрольные вопросы.....	41
Глава 4. Переработка баллиститных твердых ракетных топлив.....	42

4.1. Основные фазы переработки топлив.....	42
4.2. Удаление воды на обжимных шнековых прессах...	42
4.3. Вальцевание.....	47
4.4. Сушка.....	54
Контрольные вопросы.....	58
Глава 5. Формование изделий из баллиститных твер-	
дых ракетных топлив.....	59
5.1. Общая характеристика процессов при проходном	
шнековании.....	59
5.2. Формование изделий в раструбном пресс-	
инструменте.....	63
5.3. Реологические свойства баллиститных топлив.....	64
5.4. Производительность шнековых прессов.....	65
Контрольные вопросы.....	69
Глава 6. Энергопотребление и безопасность процесса	
проходного шнекования.....	70
6.1. Потребляемая мощность в процессе проходного	
шнекования.....	70
6.2. Безопасность процесса проходного шнекования....	71
6.3. Пресс кольцевой таблетирующий (ПКТ).....	74
6.4. Резка и охлаждение изделий.....	76
6.5. Технологические схемы непрерывной переработ-	
ки БТРТ.....	79
Контрольные вопросы.....	81
Глава 7. Изготовление изделий из баллиститных твер-	
дых ракетных топлив.....	82
7.1. Окончательные операции изготовления изделий	
из БТРТ.....	82
7.1.1. Дефектоскопия изделий.....	82
7.1.2. Механическая обработка изделий.....	85
7.1.3. Бронирование изделий.....	86
7.2. Области применения изделий из БТРТ.....	91
Контрольные вопросы.....	95
Глава 8. Смесевые твердые ракетные топлива.....	96

8.1. Состав и основные энергомассовые характеристики СТРТ.....	97
8.2. Основные технологические фазы получения СТРТ...	102
Контрольные вопросы.....	104
Глава 9. Подготовка компонентов смесового твердого ракетного топлива.....	105
9.1. Подготовка окислителя (ПХА).....	105
9.2. Приготовление рабочей смеси порошков (РСП)....	109
9.3. Приготовление горючих связующих веществ (ГСВ)...	114
Контрольные вопросы.....	117
Глава 10. Смешение компонентов смесового твердого ракетного топлива.....	118
10.1. Основные физико-химические процессы при смешении компонентов топлива.....	118
10.2. Критерии оценки качества смеси.....	123
10.3. Кинетика процесса смешения.....	125
Контрольные вопросы.....	128
Глава 11. Приготовление смесового твердого ракетного топлива.....	129
11.1. Приготовление топливной массы методом свободного литья.....	129
11.1.1. Смесители с перемешивающими устройствами...	129
11.1.2. Объемные смесители барабанного типа.....	133
11.2. Приготовление топливной массы методом литья под давлением.....	137
11.3. Подготовка пресс-форм, корпусов двигателей и технологической оснастки.....	140
Контрольные вопросы.....	143
Глава 12. Формование изделий смесового твердого ракетного топлива методом свободного литья.....	144
12.1. Формование изделий из литьевых топливных композиций.....	144
12.1.1. Истечение композиции из емкостей.....	146
12.1.2. Параметры течения композиций в массопроводах	149

12.1.3. Заполнение пресс-форм и корпусов двигателей.....	151
12.2. Формование изделий методом литья под не- большим давлением	155
Контрольные вопросы.....	159
Глава 13. Завершающие операции в производстве изде- лий из СТРТ и области их применения.....	160
13.1. Отверждение и охлаждение изделий из СТРТ....	160
13.2. Формование изделий методом проходного прес- сования.....	165
13.3. Физико-механические и теплофизические свой- ства изделий из баллистических и смесевых твер- дых ракетных топлив.....	168
13.3.1. Механические свойства топлив.....	168
13.3.2. Теплофизические характеристики топлив.....	170
13.4. Области применения изделий из СТРТ.....	170
Контрольные вопросы.....	174
Глава 14. Гибридные, воздушно-реактивные и гидро- реагирующие топлива.....	175
14.1. Общие сведения о гибридных ракетных топливах.....	175
14.2. Воздушно-реактивные топлива.....	178
14.3. Гидрореагирующие топлива.....	183
Контрольные вопросы.....	185
Глава 15. Получение изделий из гибридных твердых ракетных топлив.....	186
15.1. Приготовление топливной массы.....	186
15.2. Формование изделий.....	194
Контрольные вопросы.....	202
Глава 16. Пластичные ракетные топлива и топлива специального назначения.....	203
16.1. Пластичные ракетные топлива (ПРТ).....	203
16.2. Топлива специального назначения.....	209
Контрольные вопросы.....	215

Глава 17. Технологическая и экологическая безопасность производства твердых ракетных топлив.....	216
17.1. Пожаро- и взрывоопасность при обращении с энергонасыщенными материалами.....	216
17.2. Автоматизация производства.....	220
17.3. Экологическая безопасность.....	221
17.4. Безопасность электростатическая.....	224
Контрольные вопросы.....	225
Библиографический список.....	226

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АП ТРТ – автоматизированное производство твердого ракетного топлива

БАПС – быстродействующая автоматическая пожаротушающая система

БТРТ – баллистическое твердое ракетное топливо

ВВ – взрывчатое вещество

ВРД – воздушно-реактивный двигатель

ВРТ – воздушно-реактивное топливо

ГГТ – газогенерирующее топливо

ГДЛ – гидродинамический лазер

ГРТ – гибридное ракетное топливо

ГСВ – горючие связующие вещества

ДБФ – дибутилфталат

ДНТ – динитротолуол

ДФА – дифениламин

ЖРД – жидкостной ракетный двигатель

ЖРТ – жидкое ракетное топливо

ЖРД – жидкостной ракетный двигатель

ЗКС – защитно-крепящий слой

КВВ – коллоксилино-водная взвесь

МБР –межконтинентальная баллистическая ракета

МГДГ – магнетогидродинамический генератор

НДА – нанодисперсный алюминий

НГЦ – нитроглицерин

НЦ – нитроцеллюлоза

НХРД – нехимический ракетный двигатель

ПАВ – поверхностно-активное вещество

ПВРД – прямоточный воздушно-реактивный двигатель

ПДК – предельно-допустимая концентрация

ПКТ – пресс кольцевой таблетующий

ПТ, ПРТ – пластичное ракетное топливо

ПХА – перхлорат аммония

РД – ракетный двигатель

РДТТ – ракетный двигатель на твердом топливе

РПД – ракетный прямоточный двигатель

РСЗО – ракетная система залпового огня

РСП – рабочая смесь порошков

СЛ – свободное литье

СНД – смеситель непрерывного действия

СТРТ – смесевое твердое ракетное топливо

ТРТ – твердое ракетное топливо

УДА – ультрадисперсный алюминий

УЗК – ультразвуковые колебания

ХРД – химический ракетный двигатель

ХРТ – химическое ракетное топливо

ФМХ – физико-механические характеристики

Введение

Производство твердых ракетных топлив (ТРТ) включает в себя следующие основные технологические стадии: подготовку исходных компонентов нужного качества, получение топливной массы (смешение компонентов и реализация физико-химических процессов взаимодействия между ними), переработку топлива в изделия и завершающие операции (дефектоскопия, механическая обработка, бронирование). Каждая из указанных стадий в зависимости от вида топлива имеет свои специфические особенности, касающиеся физико-химических превращений, технологических режимов, конструкций используемого оборудования.

Принципиальное различие типов и конструкций оборудования, прежде всего, связано с характеристиками рабочей среды – агрегатным состоянием, физико-химическими свойствами, особенностями реологического поведения и т. п.

Твердые ракетные топлива относятся к классу метательных взрывчатых веществ (ВВ) и являются концентрированными источниками энергии. Одна из особенностей производства ТРТ заключается в реальной угрозе вспышки с возможным детонационным переходом во взрыв. Поэтому технике безопасности на всех стадиях производства ТРТ уделяется особое внимание. Применяют только тот технологический процесс, который наименее опасен и менее сложен в производстве. Необходимо знать, что ТРТ, как и любое ВВ, опасны лишь при известных условиях, возможность проявления которых должна быть исключена или минимизирована в производстве. Правильное проведение технологического процесса обеспечивает безопасность производства, гарантирует требуемое качество получаемых продуктов и позволяет снизить расход сырья и энергии.

В производстве ТРТ и их переработке большое значение имеют системы автоматизированного контроля технологических параметров (температуры, давления, влажности, плотности, температуры затвердевания или плавления и т.п.).

В производстве ТРТ наряду с автоматизацией контроля должно присутствовать и автоматизированное управление про-

цессами, что обеспечивает работу оборудования в оптимальных и безопасных режимах. Большое количество параметров контроля и управления неизбежно приводит к применению различных контрольно-измерительных приборов и систем, за работой которых наблюдают с помощью современных ЭВМ, объединяемых в автоматизированные информационные комплексы. Они собирают информацию о ходе технологического процесса, регистрируют и обрабатывают ее, принимают решение в реальном режиме времени и выдают команды регулирующим органам механизмов управления аппаратами, в результате чего изменяются соответствующие параметры и поддерживается оптимальный режим технологического объекта. В крайнем случае они дают команду аварийного прекращения технологического процесса и удаления реакционной массы из технологического оборудования.

Автоматизированное регулирование сочетается с дистанционным управлением, поэтому обслуживающий персонал может быть полностью выведен из опасных зон производства.

Особая роль в обеспечении технологической безопасности принадлежит оборудованию и, в первую очередь, его современным конструкциям. Для них характерна работа в режиме гибких автоматизированных модулей, автоматизированных линий и целых производств, управляемых на основе компьютерных программ.

В тех случаях, когда произошло загорание ТРТ, специальные средства должны либо подавить очаг загорания, либо не допустить перехода горения в детонацию. К таким средствам относятся системы пожаро- и взрывозащиты, специальные конструкции аппаратов, сбрасывающие нарастающее давление и т.п. В конечном итоге возгорание должно быть локализовано, не угрожать жизни операторов на пультах управления и работающих в соседних помещениях и зданиях производства.

Применяемые в настоящее время процессы и оборудование производства ТРТ далеко не в полной мере удовлетворяют всем предъявляемым к ним требованиям. Поэтому разработка новых эффективных конструкций аппаратов, машин и агрегатов производства ТРТ, снижение опасности в работе, повыше-

ние производительности, энерго- и ресурсосбережение являются важными задачами специалистов, работающих в этой области.

Физико-химические процессы на некоторых фазах производства связаны с использованием различных компонентов, в ряде случаев обладающих токсичными свойствами, способны загрязнять окружающую среду и сточные воды вредными веществами. Поэтому экологическая безопасность производства и переработки ТРТ является серьезной проблемой и ее решению необходимо уделять большое внимание.

С учетом отмеченной сложности технологических процессов производства топливных масс и их переработки в изделия, многообразием типов используемого оборудования конструкции специализированных аппаратов и машин выбирают на основе *системного анализа*. В существующей рыночной конкуренции при выборе оборудования для современного технологического процесса приходится учитывать буквально все аспекты *жизненного цикла изделия (произукции)*. Все стадии этого цикла – от научно-технической идеи, технико-экономического обоснования и бизнес-плана, проектирования, изготовления и монтажа, эксплуатации, ремонта и утилизации должны выполняться с учетом безопасности производства и соблюдением экологических норм и требований, что в конечном итоге будет определять экономическую целесообразность проекта и цену готового продукта. При этом на каждом этапе жизненного цикла изделия, в том числе и технологического объекта, следует проводить сравнение по таким показателям, как удельная энергонапряженность, удельная производительность, удельная металлоемкость, надежность и другие.

В целом ряде случаев производства ТРТ приходится учитывать тот факт, что в настоящее время и в прогнозируемом будущем будут востребованы установки со сниженными единичными мощностями, с повышенной гибкостью и возможной более частой сменой номенклатуры выпускаемой продукции и ее объема, адаптированные к информативным технологиям производства.

В данном учебном пособии рассмотрены известные способы и оборудование, используемые в технологии получения традиционных баллистических и смесевых твердых топлив.

Отдельные главы посвящены новым видам ракетных топлив – гибридным ракетным топливам (ГРТ) и пластичным ракетным топливам (ПРТ), а также вспомогательным устройствам - газогенераторам и пороховым аккумуляторам давления (ПАДам). Рассмотрено применение модифицированных баллистических и смесевых твердых топлив в качестве источника энергии в магнетогидродинамических генераторах (МГД-генераторах) и создании плазмы газодинамических лазеров.

В учебном пособии использованы материалы опубликованных в разные годы монографий, учебников и учебных пособий известных ученых, профессоров и специалистов, чьи фамилии указаны в библиографическом списке.

Автор выражает благодарность профессору В.И. Сарабьеву и профессору С.Е. Малинину за просмотр рукописи и ценные замечания.

Автор будет благодарен читателям за все замечания, направленные в его адрес.

Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ [1–4]

1.1. Введение

Ракетное оружие является одним из основных видов вооружения современных армий. Вооруженные конфликты конца XX века показали, что высокоточное реактивное оружие, как правило, определяет успех проводимой операции.

Возрастающие требования к боевой эффективности ракет и снарядов с двигателями на твердом топливе привели к разработке рецептур новых топлив, во многом изменили облик изделия в целом, значительно расширили номенклатуру и сферу применения реактивных снарядов и ракет.

Проектируются, отрабатываются и приняты на вооружение многочисленные образцы реактивных снарядов и ракет, предназначенных для поражения различных целей. Сложность решений возникающих при этом проблем обусловлена в первую очередь тем, что ракетный заряд как конструкция машиностроения изготавливают из «нетрадиционного» материала – высокоэнергетического ракетного топлива. Поэтому заряд, обеспечивающий движение ракеты или снаряда, является важным и сложным элементом реактивной системы в целом.

Надежность ракетного или реактивного заряда характеризуется двумя главными показателями:

- безотказная работа (механическая надежность);
- внутрибаллистические характеристики в составе двигателя (параметрическая надежность).

Особо следует отметить, что ракеты и ракетные системы, кроме доставки боевых зарядов для поражения различных целей, широко используют для вывода в космическое пространство пилотируемых и непилотируемых аппаратов, а также они находят применение в различных отраслях народного хозяйства (например, борьба с пожарами, градом, снежными лавинами, при бурении скважин и др.).

1.2. Общая характеристика ракетных топлив

В ракетной технике для управления движением летательных аппаратов в большинстве случаев используется принцип реактивного движения, согласно которому движущая реактивная сила возникает за счет истечения из аппарата струи рабочего тела. Реактивная сила прямо пропорциональна скорости истечения рабочего тела и секунднему расходу массы выбрасываемого вещества. Для создания реактивной силы – тяги ракетного двигателя (РД) в течение заданного интервала времени необходимо иметь запасы ракетного топлива (РТ).

Ракетные двигатели, в которых тяга создается при истечении газовых струй рабочего тела, образовавшегося в результате химического превращения при горении топлива, принято называть **химическими ракетными двигателями (ХРД)**.

Топлива – источники химической энергии, которая реализуется при их горении, получили название **химических ракетных топлив (ХРТ)**. По своей природе они относятся к классу энергетических конденсированных систем (ЭКС), характеризующихся высокой потенциальной энергией в единице объема. Они способны к устойчивому закономерному горению с выделением значительного количества теплоты и газообразных продуктов.

ХРД подразделяют на автономные и неавтономные. В *автономных ракетных двигателях* топливо расположено на борту ракеты в двигательной системе, которая включает в себя генератор энергии и устройство, создающее тяговое усилие.

В *неавтономных ракетных двигателях* один из компонентов топлива используется из окружающей среды.

Двигатели, создающие реактивную силу за счет отброса массы вещества, но использующие для ускорения этой массы другие (помимо химической) формы энергии, называют **нехимическими ракетными двигателями (НХРД)**. По виду первичного источника энергии НХРД различают:

- ядерные;
- солнечные;
- электрические;
- ионные.

Нехимические ракетные двигатели находятся пока в стадии исследования и разработки, поэтому в данном пособии не рассматриваются.

В зависимости от исходного агрегатного состояния компонентов ХРТ могут быть однофазными – **жидкими ракетными топливами** (ЖРТ) или **твердыми ракетными топливами** – (ТРТ). Ракетные топлива, состоящие из компонентов различного агрегатного состояния – жидкого или твердого, называют ХРТ смешанного агрегатного состояния или **гибридными ракетными топливами** (ГРТ).

В соответствии с приведенной классификацией химических ракетных топлив различают автономные ракетные двигатели:

- жидкостные (ЖРД);
- твердого топлива (РДТТ);
- гибридные (ГРД);
- гелеобразного (пластичного) топлива (ПРД), в которых жидкий компонент загущается и образует суспензию с твердыми компонентами;
- раздельного твердого топлива, в которых окислитель и горючее помещают отдельно, так как не могут быть совмещены.

Неавтономные ракетные двигатели подразделяют на следующие:

- воздушно-реактивные двигатели (ВРД), в которых используют воздушно-реактивные топлива (ВРТ). В качестве дополнительного окислителя и рабочего тела применяют атмосферный воздух;
- гидрореактивные двигатели, использующие гидрореактивные топлива. В качестве дополнительного окислителя и рабочего тела применяют воду из внешней среды.

Жидкое ракетное топливо – вещество или совокупность веществ в жидком состоянии, способных к химической реакции горения с выделением энергии и высокотемпературных газообразных продуктов, благодаря которым создается реактивная тяга в ЖРД.

По физическим свойствам и способам применения в ЖРД жидкие ракетные топлива различают однокомпонентные или унитарные и двухкомпонентные с отдельной подачей окислителя и горючего в камеру сгорания двигателя.

Унитарными жидкими ракетными топливами являются взрывчатые вещества (нитроэфиры, нитрометан, нитропропан, соединения гидразина и др.), а также жидкие смеси или растворы горючих компонентов и окислителей. Из-за сравнительно низких энергетических характеристик, повышенной взрывоопасности и трудностей в эксплуатации унитарные ЖРТ практически не применяются или используются в подсобных агрегатах ракетных систем для получения парогазовых смесей и обеспечения работы турбонасосного агрегата, а также в различных вспомогательных двигателях малой тяги.

Двухкомпонентные ЖРД с отдельной подачей компонентов находят основное применение в ракетных системах. В ракетах этого типа горючее (жидкий водород, керосин, соединения гидразина и другие) и окислитель (жидкий кислород, перекись водорода, смесь тетраоксида азота с азотной кислотой и другие) размещены на борту ракеты в отдельных емкостях и порционно дозируются в камеру сгорания.

Изготовление компонентов и композиций ЖРТ традиционно не является задачей производителей порохов и твердых топлив. Все остальные типы ЖРТ автономных и неавтономных ракетных двигателей являются объектами пороховой промышленности и будут рассмотрены далее.

1.3. Требования к ракетным топливам

В соответствии с назначением и условиями функционирования ракетных двигателей к ЖРТ различного агрегатного состояния предъявляют общие требования, затрагивающие энергетические, эксплуатационные и производственно-экономические характеристики.

1.3.1. Энергетические характеристики ракетных топлив

К энергетическим характеристикам РТ предъявляются очень высокие и многогранные требования для получения необходимых значений скорости и дальности полета при заданной максимальной массе полезной нагрузки ракеты.

В качестве основной энергетической характеристики ракетного двигателя используется *удельный импульс тяги*

$$I_{уд} = \frac{P}{G}, \quad (1.1)$$

где P – тяга двигателя, Н.; $G = M/t_r$ – массовый расход ракетного топлива, кг/с; M – начальная масса топлива, кг; t_r – время работы двигателя (время горения), с.

При близких значениях $I_{уд}$ предпочтение отдают топливам с меньшим значением температуры продуктов сгорания T_k , соответствующей внутрикамерному давлению p_k . Давление и температура горения не должны превышать определенных величин. Горение должно быть стабильным и не переходить во взрыв (детонацию). Для обеспечения высокого уровня $I_{уд}$ в составе продукты сгорания топлива в двигателе должны содержать меньшее количество частиц конденсированной фазы.

Существенное влияние на проектные параметры ракет, помимо $I_{уд}$ оказывает также плотность топлива ρ . Поэтому наряду с удельным импульсом по массовому расходу $I_{уд}$ используют объемный удельный импульс по объемному расходу топлива $q(\text{м}^3/\text{с})$:

$$I_{уд\text{ об.}} = \frac{P}{q} = I_{уд}\rho. \quad (1.2)$$

На практике для сравнения топлив $I_{уд}$ определяют по формуле (1.1) при стандартных условиях: давление в камере сгорания $p_k = 4$ (7, 10) МПа; давление продуктов сгорания в выходном сечении $p_a = 0$ (0,1; 0,02) МПа и при заданных величинах термодинамических параметров, например температуры продуктов сгорания в камере двигателя T_k . Экспериментальное значение $I_{уд}$ отличается от термодинамического значения на ве-

личину потерь энергии в двигателе, которые могут достигать ~6%. При близких значениях $I_{уд}$ предпочтение следует отдавать топливам с меньшим значением T_k .

1.3.2. Эксплуатационные требования

В комплекс эксплуатационных требований входят: физико-химические, физико-механические и другие характеристики, обуславливающие возможность хранения и использования топлив и компонентов в особых условиях.

Ракетные топлива и его компоненты должны иметь:

- высокую химическую стойкость – сохранять химический состав в допустимых пределах до его применения по назначению;
- физическую стойкость - сохранность агрегатного состояния в условиях хранения и транспортирования;
- комплекс физико-механических характеристик в заданном температурном интервале (относительные линейные и объемные деформации, модуль упругости, прочность на растяжение и сжатие, ударный сдвиг и срез, долговременная прочность и др.);
- малую чувствительность к механическим, тепловым и прочим импульсам;
- радиационную стойкость – способность сохранять свои основные параметры в пределах установленных норм при воздействии ионизирующего излучения и после него;
- малую коррозионную активность по отношению к конструкционным материалам;
- гарантийный срок хранения в арсеналах или на борту ракеты при заданном интервале температур и относительной влажности;
- возможно меньший дымовой след и интенсивность излучения в инфракрасном диапазоне спектра с целью снижения демаскирующих факторов.

Продукты сгорания ракетных топлив не должны содержать в значительных количествах высокотоксичные вещества, поражающие личный состав, вредные вещества, наносящие ущерб окружающей природной среде.

1.3.3. Производственно-экономические требования

Основные производственно-экономические требования к ракетным топливам включают в себя:

- наличие отечественной сырьевой базы для получения исходных веществ;
- развитые производственные мощности, обеспечивающие при необходимости массовое производство топлив;
- возможно меньшая стоимость топлив;
- исключение участие человека в выполнении производственных операций, сопряженных с опасностью для жизни;
- высокий уровень автоматизации производства, дистанционный контроль и управление;
- высокую квалификацию и профессионализм обслуживающего персонала.

Следует также добавить, что не существует такое ракетное топливо, которое полностью удовлетворяло перечисленным ранее требованиям. В каждом конкретном случае выявляются те или иные основные характеристики ХРТ, которые определяют выбор компонентов топлива и способов их получения.

В зависимости от типа ракетного топлива и его назначения к ХРТ предъявляют различные специфические требования.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение энергонасыщенным материалам или энергонасыщенным системам?
2. Что такое химические ракетные топлива (ХРТ)?
3. Назовите типы ракетных двигателей, работающих на ХРТ.
4. Перечислите основные типы ХРТ.
5. Какие параметры определяют энергетические характеристики ракетных топлив?
6. Назовите области применения ракетных и реактивных топлив.
7. Укажите эксплуатационные требования к ракетным топливам.
8. Назовите производственно-экономические требования к ракетным топливам.

Глава 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА [2,3–5]

2.1. Общие сведения о твердых ракетных топливах

Твердотопливные ракеты, в отличие от жидкостных ракет, по своему назначению пригодны для любого вида базирования:

- стационарного (шахтного);
- мобильного наземного (автомобильного, железнодорожного и других);
- воздушного (самолетного или вертолетного);
- морского и речного, в том числе и подводного.

Весьма актуальной является задача создания унифицированных ракетных комплексов многоцелевого профиля для различных видов базирования. Высокая физическая и химическая стабильность ТРТ и ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) обеспечивают длительный гарантийный срок их служебной пригодности. Ракеты на твердом топливе удобны в эксплуатации, их обслуживает малочисленный персонал, и они не подвержены коррозии от воздействия высокоагрессивных и токсичных жидких компонентов топлива.

Твердотопливные ракеты успешно применяют для борьбы с градом, для образования дождя в борьбе с засухой и лесными пожарами, скоростного бурения грунта. В последнем случае ракетный двигатель объединяют с буровой головкой и конструкция функционирует в режиме полной автономии без энергетической связи с окружающим пространством.

Исторически сложилось, что твердые ракетные топлива классифицируют на следующие виды:

- баллиститные твердые ракетные топлива (БТРТ);
- смесевые твердые ракетные топлива (СТРТ).

БТРТ является аналогом отечественных баллиститных порохов. Это твердый раствор нитрата целлюлозы (НЦ) и энерге-

тически активного пластификатора, наиболее часто нитроглицерина (НГЦ). Под действием пластификатора снижается температура стеклования нитратов целлюлозы, которая превращается из стеклообразного в термопластичное состояние. Благодаря этому при повышенной температуре порядка 70–80⁰С возможно формовать заряды БТРТ диаметром до одного метра способом проходного шнекования (экструзии).

По международной классификации топлив [2,4] баллиститные пороха и твердые ракетные топлива относят к *гомогенным двухосновным* системам.

СТРТ – это твердый высоконаполненный композиционный материал, в объеме полимерной матрицы затвердевшего связующего равномерно распределены порошки мелкодисперсного окислителя, металлического (металлизированного) горючего и специальные компоненты, в том числе вещества для полимеризации или вулканизации топливной массы. Вязкие текучие свойства полимерного пластифицированного связующего в исходном состоянии придают топливной массе текучие свойства, которые позволяют формировать заряды способом свободного литья или под небольшим давлением практически любого размера и формы.

По международной классификации топлив [2,4] смесевые твердые ракетные топлива относят к *гетерогенным* или *композиционным* топливам.

В отличие от баллиститных твердых ракетных топлив СТРТ имеют большую энергетику; они устойчиво горят при меньших давлениях. Производство ракетных зарядов из СТРТ более простое по сравнению с БТРТ.

Вместе с тем, анализ современных высокоэнергетических составов твердых ракетных топлив показывает, что строгой границы между баллиститными и смесевыми ракетными топливами не существует. Проведенные модификации классических баллиститных порохов и топлив в целях повышения энергетических и других характеристик превратили их в многофазные гетерогенные системы. Полимерную основу баллиститных топлив в виде нитратов целлюлозы и энергоемкого пластификатора используют в качестве связующего-горючего в составах СТРТ.

Специальные требования к ТРТ как специфическому виду ЭКС во многом связаны с условиями функционирования соответствующего типа двигателя. Принципиальное устройство ракетного двигателя с ТРТ показано на рис. 2.1.

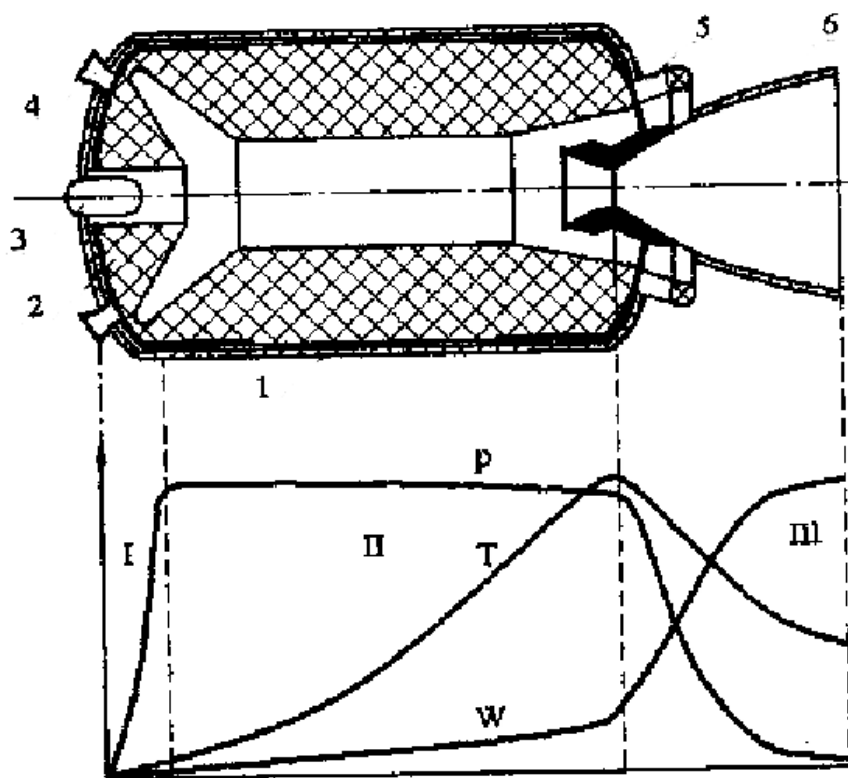


Рис. 2.1. Схема РДТТ, периоды и изменение параметров по тракту [3]:

1 – корпус; 2 – заряд; 3 – воспламенитель; 4 – система выключения тяги; 5 – система управления вектором тяги; 6 – газодинамическое сопло; I – выход на режим; II – основной период; III – истечение продуктов сгорания

Ракетный двигатель твердого топлива (РДТТ) в общем случае содержит корпус 1, в котором размещен топливный заряд 2, устройство воспламенения 3, газодинамическое сопло 6, система управления вектором тяги 5 и система выключения тяги 4. Основная особенность РДТТ по сравнению с ЖРД состоит в том, что топливо находится в твердом агрегатном состоянии и в виде одного или нескольких блоков, называемых зарядом, располагается в камере сгорания. Это особенность влияет на конструктивное отличие РДТТ и определяет условия его рабо-

ты. Размеры и форма заряда обеспечивают заданное время работы двигателя, закономерность газообразования, величину и характер изменения тяги во времени. При этом характеристики топлива и заряда в целом существенно влияют на характеристики двигателя и самой ракеты.

При рассмотрении рабочего процесса в РДТТ, в ходе которого происходит преобразование химической энергии топлива в кинетическую энергию истекающих через сопло продуктов сгорания и реактивную силу (тягу), выделяют три периода по тракту двигателя (рис. 2.1): выход двигателя на режим, основной период, истечение продуктов сгорания через сопло (спад давления) [3]. Первый период (зона *I* на рис. 2.1) – время выхода на режим включает время задержки воспламенения и собственно воспламенение заряда; продолжительность первого периода составляет от нескольких сотых до нескольких десятых долей секунды. За это время сгорает до 1% массы топлива, а давление в камере сгорания p_k достигает $\sim 0,9 p_a$ (p_{cp} – среднее интегральное давление за время работы двигателя). Время выхода на режим существенно влияет на основной период работы двигателя. Введение специальных добавок в состав топлива или нанесение их на поверхность заряда может сократить время выхода на режим горения.

Основной период работы двигателя (зона *II* на рис. 2.1) составляет 90% времени горения заряда. В этой зоне стабилизируются баллистические характеристики ТРТ – зависимость скорости горения U от давления p ; происходит значительный рост температуры T при некотором увеличении скорости истечения продуктов сгорания. В зоне соплового блока *III* истечение продуктов сгорания сопровождается спадом давления.

Внутренний канал в топливе может быть гладким цилиндрическим или иметь более сложную форму (см. рис. 2.1). В первом случае тяга двигателя увеличивается по мере выгорания топлива и возрастания поверхности горения; при сложной форме центрального канала тяга двигателя в начальный период может быть выше или она сохраняет постоянное значение за весь период работы двигателя и зависит от поверхности горения.

Баллистические характеристики ТРТ. Зависимость скорости горения топлива U от давления в камере сгорания p в широком диапазоне давлений определяется следующим выражением:

$$U = a + bp^\nu, \quad (3)$$

где $0 < \nu < 1$.

В диапазоне $p < 30$ МПа, характерном для РДТТ, скорость горения аппроксимируют степенной зависимостью $U = bp^\nu$. При более высоких давлениях – линейной зависимостью $U = a + bp$.

БТРТ обеспечивают устойчивое горение при давлении в камере сгорания не менее 10 МПа, в то время как СТРТ при давлении 5 – 7 МПа.

Современные твердые топлива имеют удельный импульс порядка 2300 – 2500 Н·с/кг и плотность около 1700 кг/м³; по энергетической эффективности они приблизились к жидким ракетным топливам.

Механические характеристики ТРТ. Основными стандартными характеристиками механических свойств ТРТ являются показатели прочности и деформируемости. Механические характеристики ракетного заряда определяют способ размещения и крепления его в ракетном двигателе. При низкой деформируемости топлива ракетные заряды, как правило, делают вкладными. Из топлив с высоким уровнем относительной деформации формируют ракетные заряды, которые полностью или частично скрепляют со стенками камеры сгорания РД. Вкладные заряды формируют отдельно и размещают в камере сгорания с некоторым зазором относительно стенок двигателя. От перемещения их фиксируют с помощью диафрагм, упоров и других элементов конструкции РД.

БТРТ имеют предельные напряжения на растяжение $\sigma_p \sim 5\text{--}10$ МПа и сжатия $\sigma_{сж} \sim 10\text{--}20$ МПа, предельная относительная деформация при растяжении $\varepsilon_p \sim 5\text{--}15$ %. Поэтому в большинстве случаев вкладные заряды изготавливают из баллистических твердых ракетных топлив.

Ракетные заряды из СТРТ характеризуются высокой деформируемостью ($\varepsilon_p \sim 30\text{--}50\%$), но сравнительно низкой прочностью ($\sigma_p \sim 0,4 - 0,6$ МПа). Заряды из СТРТ, как правило, прочно скреплены с корпусом ракетного двигателя.

Использование вкладных зарядов позволяет упростить снаряжение ракетного двигателя топливом и при необходимости осуществлять их замену. Вместе с тем РД с вкладными зарядами обладают низким коэффициентом заполнения корпуса топливом, что снижает такой параметр как коэффициент массового совершенства РД

$$\alpha_{рд} = M_{кд}/M_T,$$

где $M_{кд}$, M_T – масса конструкции неснаряженного двигателя и топлива в двигателе соответственно.

Ракетные двигатели из баллистических топлив имеют $\alpha_{рд} = 0,15 - 0,20$. Вкладную схему крепления ракетных зарядов применяют в двигателях небольших размеров и с непродолжительным временем его работы.

В ракетных двигателях скрепленные со стенками заряды получают из литьевых составов СТРТ при заполнении топливной массы непосредственно в камеру сгорания. В процессе отверждения топливная масса образует прочный адгезионный спай с защитным демпфирующим слоем камеры сгорания, на внутреннюю поверхность которого наносится клеящий состав. При таком способе крепления ракетного заряда коэффициент $\alpha_{рд}$ снижается и составляет $\sim 0,04 - 0,08$. РДТТ из смесевых твердых топлив нашли широкое применение в крупногабаритных многоступенчатых ракетных системах, ускорителях мощных ракетных носителей и других.

Твердые топлива обладают достаточной стабильностью основных характеристик под воздействием внутренних и внешних факторов в течение гарантийных сроков эксплуатации ракет порядка 15 – 20 лет.

2.2. Основные стадии получения и переработки топлив

Основными стадиями производства ТРТ являются:

- получение топливных масс;
- переработка их в изделия (ракетные заряды).

На стадии получения топливных масс обеспечивают точную дозировку предварительно подготовленных компонентов, входящих в их состав, и необходимую последовательность их ввода в технологический процесс. Некоторые компоненты смешиваются между собой заранее и затем поступают в основной технологический аппарат, в котором происходит механическое смешение компонентов, сложные физико-химические процессы взаимодействия между ними. В результате получается однородная топливная масса, имеющая необходимые физико-химические и физико-механические характеристики.

Технологические способы переработки топливных масс в ракетные заряды определенной формы и размеров определяются совокупностью следующих характеристик топливной массы:

- высокой степенью однородности, когда в любом достаточно малом объеме топливной массы содержание всех компонентов должно соответствовать заданному составу;
- необходимым комплексом реологических свойств в интервале температур 20–80 °С;
- седиментационной и агрегативной устойчивостью порошкообразных наполнителей топливных масс;
- по возможности низкой чувствительностью к механическим и другим импульсам при получении и переработке топливных масс;
- быстрым и эффективным автоматизированным контролем и мониторингом за технологическим процессом без участия человека;
- необходимыми экспресс-методами отбора проб топлива и их анализа;
- массовым производством топлива с использованием отечественного сырья, унифицированного отечественного технологического оборудования и средств автоматики с высокой степенью надежности;
- экологической чистотой и безотходностью производства;
- наличием так называемых «двойных технологий» для получения продуктов военного и гражданского назначения.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие РДТТ от ЖРД?
2. Назовите основные типы ракетного топлива, используемого в РДТТ.
3. Чем отличаются характеристики горения БТРТ и СТРТ?
4. Сформулируйте основные требования к ракетным зарядам раздельного заполнения РД и прочно скрепленным зарядам в РД.
5. Дайте определение коэффициенту совершенства заполнения топливом ракетного двигателя. Каковы его значения для вкладных и прочно скрепленных ракетных зарядов?
6. Укажите порядок величины ν в уравнениях скорости горения топлива в зависимости от давления в камере сгорания.
7. Назовите специальные требования к твердым ракетным топливам.

Глава 3. ПОЛУЧЕНИЕ БАЛЛИСТИТНЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ [2,3,5–8]

3.1. Исторические этапы производства баллиститных ракетных топлив

В основу производства баллиститных твердых ракетных топлив положена непрерывная шнековая технология, разработанная ОТБ-98 под руководством А.С. Бакаева и внедренная в период Великой Отечественной войны 1941-1945 гг. Эта технология не имела аналогов за рубежом и обеспечила во время войны массовое изготовление зарядов для всех типов легендарных «катюш».

В период 1950–1965 гг. производство баллиститных порохов было значительно модернизировано, в результате чего получены крупногабаритные заряды диаметром 800 мм для первой отечественной твердотопливной ракеты стратегического назначения – РТ-1 конструкции С.П. Королева.

В последующие 1970–1990 гг. были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по интенсификации производства высокоэнергетических составов баллиститных порохов нового поколения. Возникла необходимость существенного повышения однородности топливной массы, сокращения времени технологического цикла ее производства. Особое внимание уделялось разработке нового типа оборудования, которое было бы снабжено всеми необходимыми средствами пожаро- и взрывозащиты и гарантировало надежную и безопасную работу без присутствия человека. В результате были созданы гибкие автоматизированные комплексы по производству и переработке в изделия баллиститных топлив с улучшенными энергомассовыми характеристиками и с достаточной физико-химической стабильностью [5,6].

Для большинства современных БТРТ скорость горения при $p = 4$ МПа достигает 30 и 50 мм/с, а удельный импульс $I_{уд} \approx 2500$ (Н·с)/кг и $\rho \approx 1850$ кг/м³.

Дальнейшее существенное повышение энергомассовых характеристик БТРТ предполагает использование высокоазотных НЦ – пироксилинов и более активных по сравнению с нитроглицерином высокоэнтальпийных пластификаторов и мощных ВВ. В результате БТРТ по существу становятся смесевыми твердыми ракетными топливами на основе активного связующего. За рубежом такие БТРТ относят к классу модифицированных двухосновных топлив.

3.2. Состав топлив

Баллиститные твердые ракетные топлива (БТРТ), как и баллиститные пороха, представляют собой термопластичную полимерную двухосновную энергетическую конденсированную систему, включающую нитраты целлюлозы и энергоемкий пластификатор. В отличие от порохов БТРТ содержат ряд добавок специального назначения.

В состав ракетного топлива входят следующие компоненты:

нитроцеллюлоза (НЦ) в виде коллоксилина с содержанием азота 11,8 – 12,3 %;

энергоемкие пластификаторы – нитроглицерин (НГЦ) и другие;

дополнительные пластификаторы – дибутилфталат (ДБФ), динитротолуол (ДНТ) и другие;

стабилизаторы химической стойкости – централиты, дифениламин (ДФА) и другие;

энергетические добавки – мощные ВВ (гексоген, октоген), порошки алюминия и его сплавов с магнием и другие; эти вещества обладают высокой теплотой сгорания и увеличивают удельный импульс топлива;

стабилизаторы горения – MgO , TiO_2 , Al_2O_3 и другие; эти вещества устраняют высокочастотную нестабильность процесса горения;

катализаторы горения – неорганические и металлоорганические соединения Pb , Cu , Co , Fe , Ni и другие; эти вещества уменьшают или увеличивают скорость горения топлива и влияют на зависимость скорости горения от давления в камере сгорания;

технологические добавки – вещества (вазелин, промышленное масло, графит и другие), снижающие чувствительность к различным импульсам (трению, удару, свету) и показатели пожаро–и взрывоопасности;

пламегасящие добавки – KNO_3 , K_2SO_4 , $\text{K}_3[\text{Co}(\text{NO}_2)]_6$ и др.

По уровню энергетических характеристик БТРТ подразделяют на составы без энергетических добавок и составы с энергетическими добавками. Принципиальные усредненные составы БТРТ приведены в табл. 3.1

Таблица 3.1

Принципиальный состав и основные характеристики БТРТ
[3]

Компоненты	Содержание компонентов в составах, %	
	Без энергетических добавок	С энергетическими добавками
<i>Нитроцеллюлоза</i> (коллоксилин, смесь с пироксилином)	40 – 60	25 – 35
<i>Нитроглицерин</i> (смесь активных пластификаторов) и дополнительные пластификаторы (ДБФ, ДНТ и др.)	25 – 40	25 – 35
<i>Стабилизаторы химической стойкости</i> (ДБФ, централиты)	1,5 – 3,0	1,5 – 2,0
<i>Энергетические добавки:</i> - мощные ВВ (гексоген, октоген и др.); - металлическое горючее	-	25 – 35
<i>Стабилизаторы горения</i> (MgO , TiO_2 , CaCO_3 и др.)	- 1,5 – 3,0	10 - 15 до 1,0
<i>Катализаторы горения</i> (соединения Pb, Cu, Co, Ni и др.)	до 4,0	до 1,0
<i>Технологические добавки</i> (вазелин, индустр. масло, графит)	до 1,0	до 1,0
<i>Удельный импульс, Н·с/кг</i>	1750	2400
<i>Плотность, кг/м³</i>	1550	1700

3.3. Основные сведения о технологии производства баллиститных топлив

Топливные баллиститные массы по существующей технологии изготавливают непрерывным способом путем смешения компонентов в водной среде, как правило, в виде суспензий и эмульсий, имеющих концентрацию порядка 7 – 10 мас.%. При этом решают следующие задачи:

- получение точной дозировки всех компонентов, входящих в топливную массу;
- равномерное распределение всех компонентов между собой, от этого зависят физико-химические и внутрибаллистические свойства готовых изделий;
- достижение наибольшей глубины взаимодействия НЦ с НГЦ и другими пластификаторами;
- создание прочных связей всех компонентов с волокнами НЦ, что обеспечивает необходимые физико-механические характеристики топлива;
- безопасность смешения всех компонентов, для чего процесс смешения осуществляют в воде.

При изготовлении баллиститного топлива последовательно проводят следующие технологические фазы производства:

- подготовка и дозирование компонентов;
- смешение компонентов в водной среде (приготовление топливной массы);
- усреднение топливной массы и формирование общих партий.

3.3.1. Подготовка компонентов баллиститных топлив

Подготовка компонентов заключается в приготовлении *водных суспензий* нитроцеллюлозы, мощных ВВ, металлических порошков, стабилизаторов и катализаторов горения; *эмульсий* нитроглицерина и других пластификаторов (ДБФ, ДНТ), также стабилизаторов химической стойкости (централи-ты, ДФА).

Порошки алюминия и магния оксида (MgO) активны по отношению к воде. Поэтому порошки алюминия предварительно пассивируют и гидрофобизируют, а порошки магния оксида гидратируют и также гидрофобизируют.

Пассивация – это создание на поверхности частиц защитного слоя из молекул другого вещества (пассиватора), который будет компенсировать химическую активность поверхности.

Наиболее важной является оксидная пассивация металлов, поскольку самый распространенный пассиватор – кислород.

Гидрофобизация – это образование на поверхности частиц хемосорбированной пленки вещества, которая не смачивается водой.

Например, порошки металлов гидрофобизируют обработкой их стеаратами металлов.

Гидратация – это взаимодействие вещества с водой, при котором молекулы воды не разрушаются и часто образуются гидроксиды.

Гидроксид магния вызывает щелочной гидролиз нитроэфиров, что ведет к их потере. Поэтому порошок магния оксида предварительно подвергают гидратации в горячей воде при 75-85 °С, а затем гидрофобизации расплавом стеарата цинка в ДБФ, ДНТ или индустриальном масле с образованием защитной пленки стеарата магния.

Водные суспензии катализаторов горения в целом ряде случаев подвергают дополнительному тонкому измельчению для механохимической активации каталитического действия и большей однородности распределения в топливной массе.

Механохимическая активация – это повышение эффективности физико-химических превращений, которые происходят в твердых веществах при измельчении, действие ударных волн, высокого давления в сочетании с деформацией сдвига, кавитации жидкой сплошной среды и т.п.

Суспензии и эмульсии, за исключением коллоксилиноводной взвеси (КВВ), стабилизируются поверхностно-активными веществами (ПАВ).

3.3.2. Дозирование компонентов

Для непрерывного дозирования порошкообразных компонентов на стадии приготовления растворов и суспензий используют:

- объемные тарельчатые дозаторы;
- весовые дозаторы типа ДН; погрешность дозирования $\pm 1\%$;
- весовые дозаторы типа АСД-500, предназначенные для дозирования сыпучих компонентов (централит, ДФА, MgO, Pb₂O₃, TiO₂; Co₃O₄, C, CaCO₃ и другие).

Для дозирования суспензий и эмульсий применяют:

- объемно-импульсные дозаторы для жидких компонентов КВВ, ДНТ, ДБФ, вазелинового масла;
- объемно-импульсные дозаторы мембранного типа для дозирования НГЦ и других нитроэфиров;
- винтовые насосы и другие механизмы [5].

Вещества, растворимые в воде (например, калия и цезия нитратов), вводят в топливную массу на последующей стадии вальцевания после удаления воды из топлива.

Компоненты в нужной пропорции по существующей схеме подготовки топлива поступают в два последовательно работающих реактора (варочные котлы) и далее в смеситель общих партий, где происходят процессы пластификации нитроцеллюлозы и гомогенизация топливной композиции.

3.3.3. Приготовление суспензий порошкообразных компонентов

Технологическая схема транспортировки сыпучих компонентов показана на рис. 3.1. Сыпучие компоненты из тары 1 по вакуумному трубопроводу подают в стационарный бункер 5. Отделение порошка от воздуха осуществляется в циклонах первичной 2 и вторичной 3 очистки. Циклон первичной очистки соединен с бункером 5 через клапан разгрузки 4.

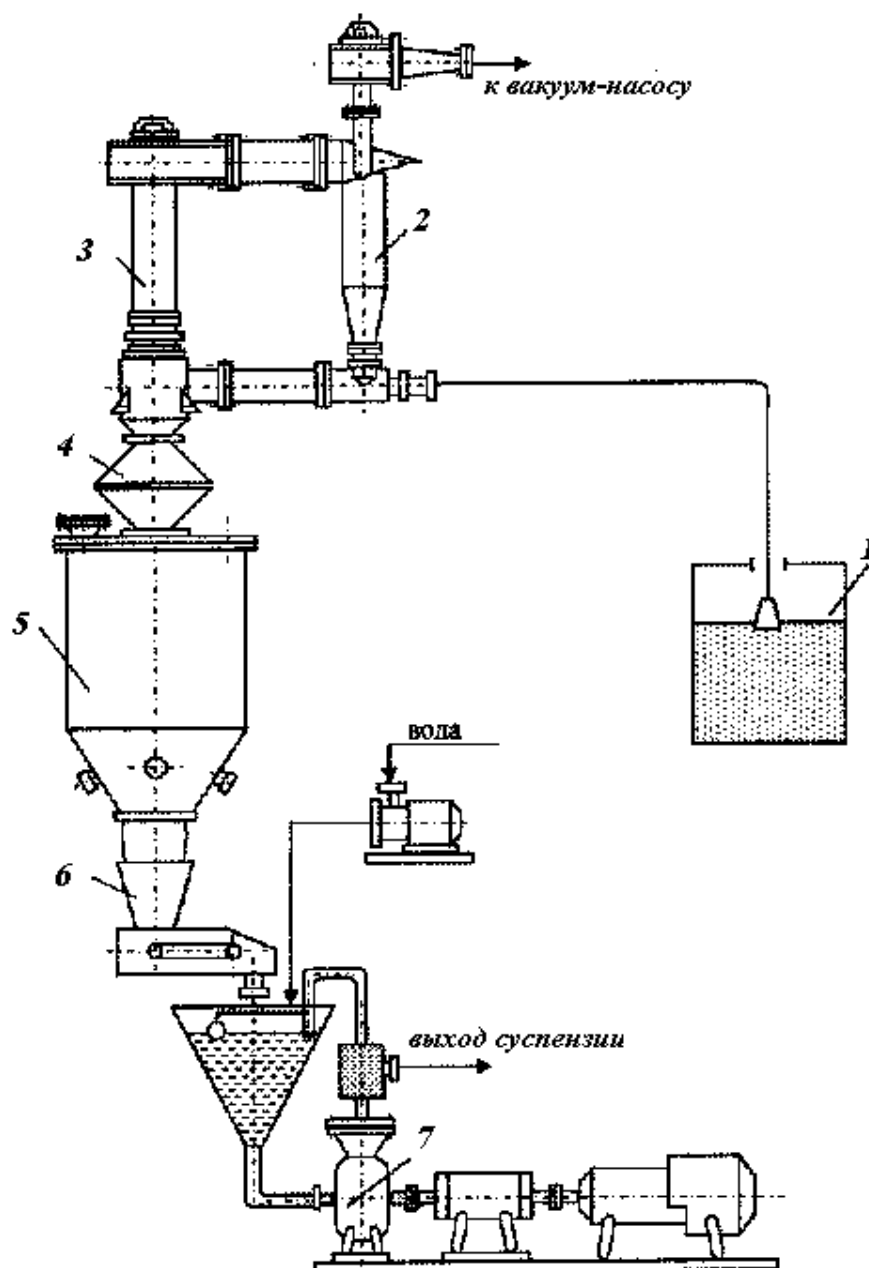


Рис.3.1. Принципиальная схема подготовки суспензий из сыпучих компонентов [5]:

1 – тара; 2,3 - циклоны первичной и вторичной очистки соответственно; 4 – клапан разгрузки; 5 – бункер; 6 – дозатор типа ДН; 7 – аппарат приготовления и транспортировки суспензий (АПТС)

Вакуум в транспортном тракте создается водокольцевым насосом типа ВВН. Для очистки воздуха в системе предусмотрен «мокрый» фильтр. Порошок из бункера 5 проходит дозатор типа ДН и поступает в гидродинамический аппарат типа АПТС (аппарат приготовления и транспортировки суспензий).

Аппарат АПТС (рис. 3.2) включает в себя центробежный насос 1, излучатель 2, всасывающий патрубок 3, циркуляционный 7 и напорный 6 трубопроводы, регулятор уровня 4, датчик давления, распределительный кран 8, фильтр 9.

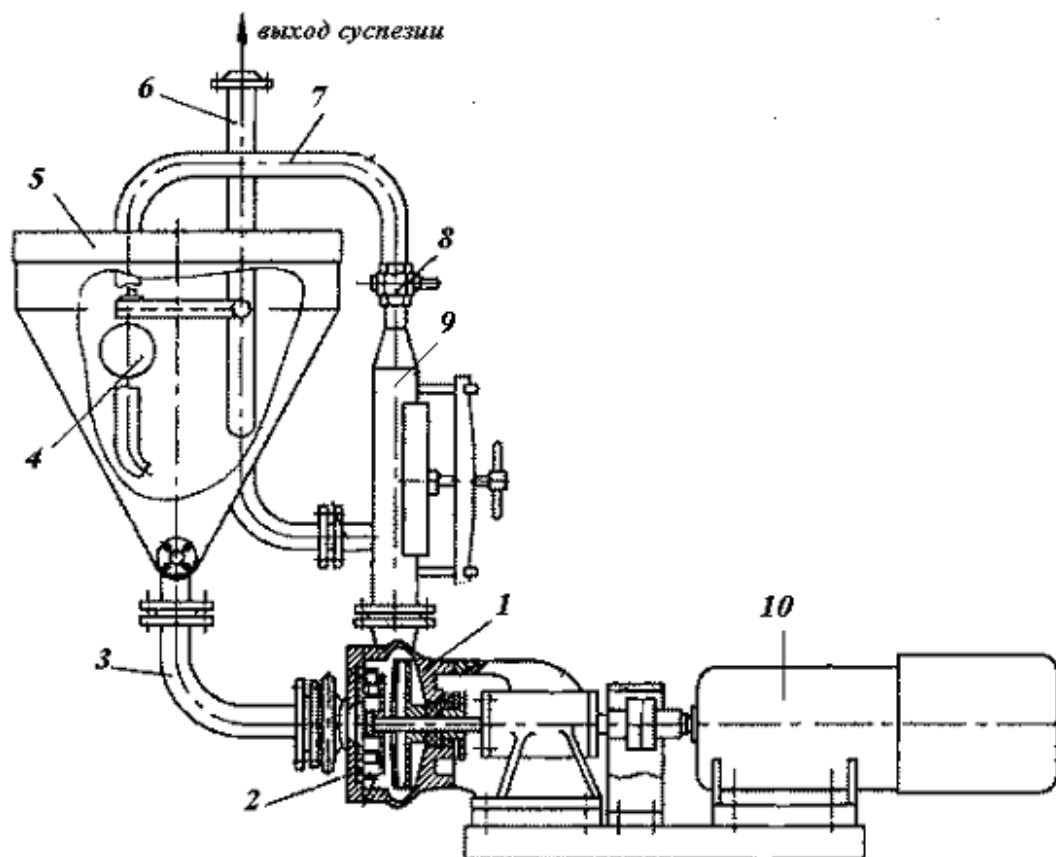


Рис. 3.2. Аппарат приготовления и транспортировки суспензий (АПТС) [5]

Центробежный насос с помощью электродвигателя 10 осуществляет циркуляцию суспензии по трубопроводам 3 и 7. Суспензия рабочей фракции удаляется из потока в фильтре 9, поступает в напорный трубопровод 6 и выводится из аппарата. С помощью гидродинамического аппарата роторного типа (рис. 3.3), состоящего из ротора и статора, в насосе создаются гидродинамические кавитации, которые измельчают крупные фракции дисперсной фазы суспензии и делают ее более однородной.

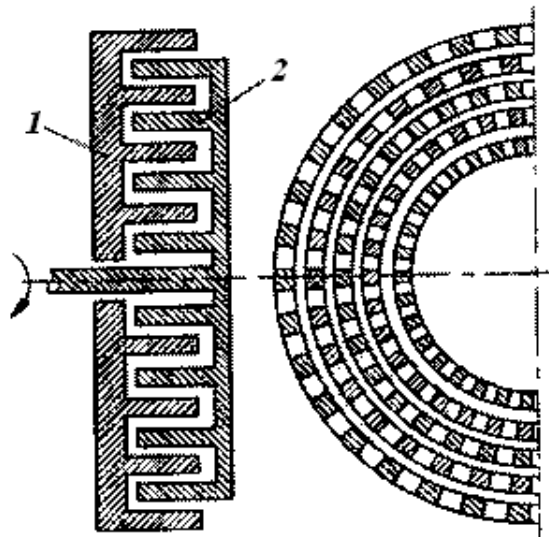


Рис.3.3. Гидродинамический аппарат роторного типа (ГАРТ) [5]:
1 – статор; 2 – ротор

3.3.4. Смешение компонентов топлива

Компоненты топлива последовательно смешивают в двух реакторах емкостного типа объемом 1 м^3 каждый; они соединены переливной трубой и снабжены рубашкой обогрева, диффузором и механической турбинной мешалкой (рис. 3.4).

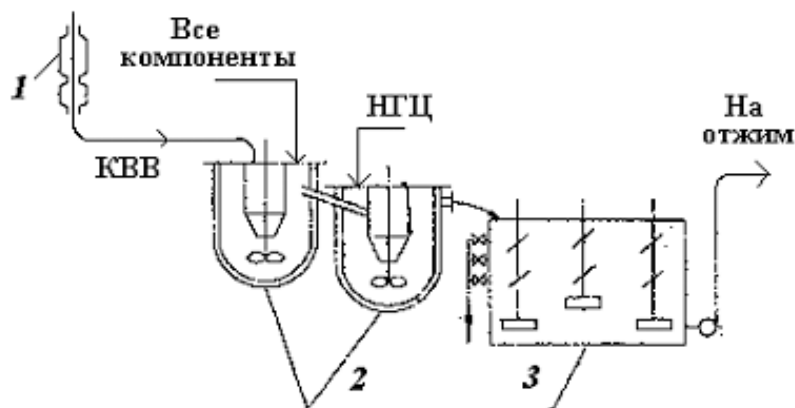


Рис. 3.4. Принципиальная технологическая схема приготовления баллиститного топлива непрерывным способом:
1 – объемно-импульсный дозатор КВВ; 2 – реакторы;
3 – смеситель общих партий

Реакторы 2 отличаются друг от друга только расположением штуцеров на верхних крышках для ввода соответствующих компонентов.

В первый реактор последовательно подают водную суспензию КВВ с помощью объемно-импульсного дозатора 1, вазелиновое масло, суспензии катализаторов, мощных ВВ (гексогена, октогена), гидратированного и гидрофобизованного магния оксида, пассивированных и гидрофобизованных порошкообразных металлов и мощных ВВ. Топливная масса по переливной трубе непрерывно поступает во второй реактор, в который инжектируется водная эмульсия пластификаторов. Реакторы обогреваются горячей водой.

Из второго реактора 2 топливная смесь в воде поступает в смеситель общих партий 3, в которых осуществляется длительное перемешивание для окончательного распределения пластификатора, и усреднение композиции. Объем аппарата составляет 100 м³; он снабжен пятью механическими мешалками, вращающимися с частотой 180 об/мин. Срок хранения топливной массы в водной среде до начала процесса ее переработки в изделия ограничивается в зависимости от состава 1 – 6 сутками [5].

3.4. Физико-химические особенности процесса получения БТРТ

Основу изготовления баллиститных топлив составляет процесс пластификации НЦ энергетическим пластификатором, как правило, НГЦ.

На первой стадии взаимодействия НЦ поглощает пластификатор, набухает, увеличиваясь по массе и объему. НГЦ смачивает поверхность НЦ и проникает в капиллярную систему. В этих процессах большую роль играют поверхностные и капиллярные явления; чем меньше значения удельных поверхностных энергий на границах НЦ – растворитель и растворитель – воздух, а также вязкость НГЦ, тем быстрее и полнее протекают процессы смачивания и капиллярной пропитки при прочих равных условиях.

Следующей стадией является собственно диффузия НГЦ в нитроцеллюлозу. Она протекает одновременно с первой и сопровождается взаимодействием функциональных групп мак-

ромолекул НЦ с молекулами НГЦ с образованием сольватов, что приводит к ослаблению межмолекулярных связей. В результате образуется высокомолекулярный раствор нитроглицерина в НЦ. Интенсивность взаимодействия определяется термодинамическим сродством компонентов. В результате этих самопроизвольно идущих процессов НЦ приобретает пластические свойства, требуемые для формования ракетных зарядов из пороховых масс.

Ускорение процесса пластификации на этой стадии обеспечивается, главным образом, повышением температуры до 75-85 °С и использованием тонкодисперсных эмульсий пластификаторов.

Таким образом, под *пластификацией* следует понимать физико-химические процессы смачивания и проникновения растворителя в волокнисто-пористую структуру НЦ, сопровождающиеся частичным растворением и разрушением структуры, увеличением подвижности отдельных ее элементов, что приводит в итоге к повышению однородности и пластичности топливной массы, а также механической прочности получаемых изделий.

Положительная роль водной среды при получении баллистических ракетных топлив заключается в следующем:

- способствует более равномерному распределению НГЦ по объему волокон НЦ;
- содействует проникновению НГЦ в наиболее узкие капилляры и межмолекулярные пространства НЦ и облегчает процесс пластификации нитроцеллюлозы;
- обеспечивает безопасность процесса смешения компонентов.

Однако вода препятствует окончательному или глубинному процессу пластификации и должна быть удалена из баллистического ракетного топлива на последующих стадиях производства.

Повышение эффективности процесса пластификации НЦ и ускорения каждой из составляющих стадий этого процесса: смачивания, капиллярной пропитки и диффузии достигается

при перемешивании компонентов в режиме гидродинамической кавитации. На рис. 3.5 показана принципиальная схема смешения топливной массы в гидродинамическом смесителе.

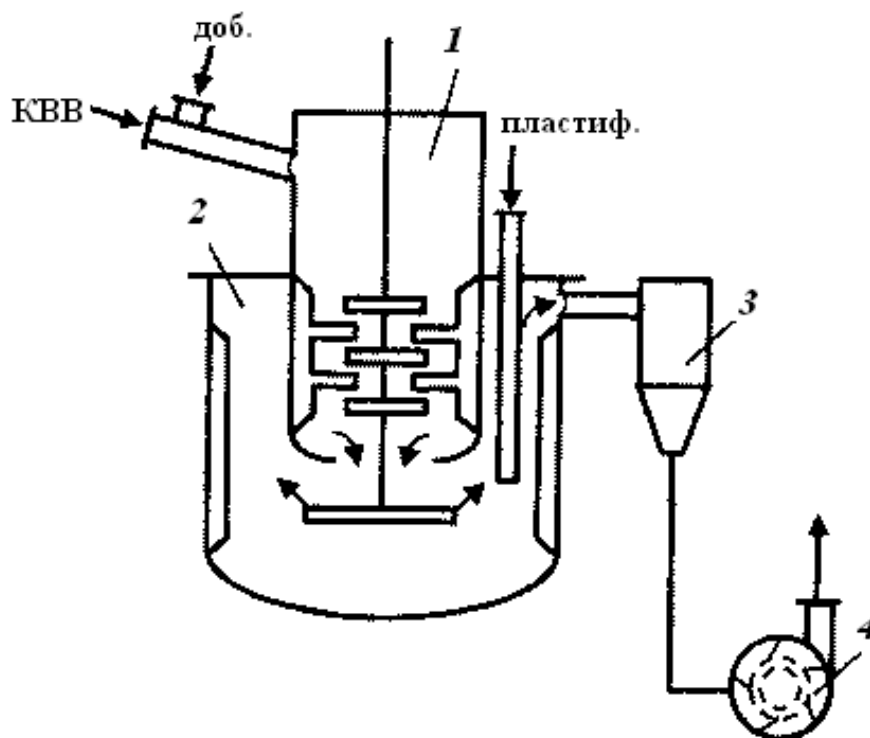


Рис. 3.5. Принципиальная схема смешения топливной массы в гидродинамическом смесителе [5]:

1 – форсмесительная камера; 2 – камера усреднения; 3 – переливное устройство; 4 – гидродинамический смеситель-насос (например, ГАРТ)

Целесообразно использование высокочастотных волновых колебаний, резонансных по частоте межмолекулярным колебаниям в структуре нитроцеллюлозы (порядка 10^{12} с^{-1}), а также за счет применения тонкодисперсных эмульсий пластификаторов и суспензий НЦ.

На этой научной основе созданы гидродинамические и электромагнитные вихревые аппараты, которые прошли производственные испытания и допущены к промышленному использованию. К ним относятся [5]:

- гидродинамический аппарат роторного типа (ГАРТ) с высокой энергией смешения и кавитационным эффектом;

- электромагнитные вихревые смесители (ЭВС) с переменным электромагнитным полем, высокой механической энергией смешения и значительным уровнем кавитации;
- аппараты с ультразвуковыми генераторами;
- аппараты с высокочастотными излучателями (СВЧ-генераторами).

Таким образом, оптимизацию производственного процесса смешения компонентов БТРТ можно рассматривать как:

- повышение интенсивности процесса смешения *гидродинамическими аппаратами* совместно с форсмесителями для подготовки компонентов;
- ускорение капиллярной пропитки за счет применения, например кавитационных режимов, создаваемых излучателями с необходимой частотой и амплитудой колебаний (ультразвуковых).

Контрольные вопросы

1. Назовите принципиальный состав компонентов БТРТ. Какова роль каждого из них?
2. Какие основные технологические фазы производства БТРТ?
3. Почему смешение компонентов БТРТ осуществляют в водной среде?
4. Дайте определение процессам пассивации и гидрофобизирования твердых порошков – компонентов БТРТ;
5. В чем заключается физико-химический процесс пластификации НЦ?
6. Какова роль температуры в процессе диффузии НГЦ в волокна НЦ и порядок температуры при смешении компонентов баллиститного ракетного топлива?
7. Приведите примеры интенсификации процесса пластификации НЦ нитроглицерином и используемого оборудования.

Глава 4. ПЕРЕРАБОТКА БАЛЛИСТИТНЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ [5–9, 11]

4.1. Основные фазы переработки топлив

Современные БТРТ являются сложными композиционными системами, отличающимися от первоначальных гомогенных баллиститных порохов высокой степенью гетерогенности и повышенной взрывоопасностью на фазах производства за счет наполнения составов порошкообразными металлическим горючим, ВВ, катализаторами, ингибиторами и т.д.

Вследствие этого технологические процессы как производства, так и переработки баллиститных топлив в изделия значительно усложнились.

Рассматривая технологию переработки баллиститного топлива в историческом плане, следует отметить длительный путь ее совершенствования от начального периодического до современного непрерывного производства с высокой степенью автоматизации.

Существующая технология переработки баллиститного топлива, как правило, включает в себя следующие основные фазы производства:

- удаление воды на отжимных шнековых прессах (отжим воды);
- гомогенизацию, окончательную пластификацию и сушку топлива на вальцевых прессах непрерывного действия (вальцевание);
- окончательную сушку в сушильных агрегатах (сушка);
- гранулирование топлива в таблетирующих прессах (гранулирование);
- изготовление шашек-заготовок (формование);
- концевые операции (изготовление ракетных зарядов).

4.2. Удаление воды на отжимных шнековых прессах

Конструкция отжимного пресса. После приготовления топливной массы ее водную суспензию направляют на отжим

воды при 30–60 °С, который осуществляют в отжимном прессе ПО-125 (рис.4.1,а). В зоне загрузочной воронки 7 пресса происходит свободное гравитационное удаление жидкой фазы через фильтрующее устройство 10. При движении топливной массы вдоль шнека 5 в корпусе пресса 4 ее сжимают и механическим путем удаляют воду за счет возникающего перепада давления от 1,0 до 10,0 МПа. По длине винтовой наливки шнека происходит фильтрация влаги в противоположном направлении движения твердой фазы. Отфильтрованная топливная масса проходит фильеру 2 и срезается ножом 1 на куски неправильной формы с остаточной влажностью 10–12 %, мас. Дополнительное удаление ее осуществляется за счет диффузионного вакуумного испарения влаги в вакуумной камере 11. В результате влажность топливной массы снижается до 6–8 %, мас. Нижний предел влажности топлива после отжимного аппарата обеспечивается при использовании вакуумной камеры 11.

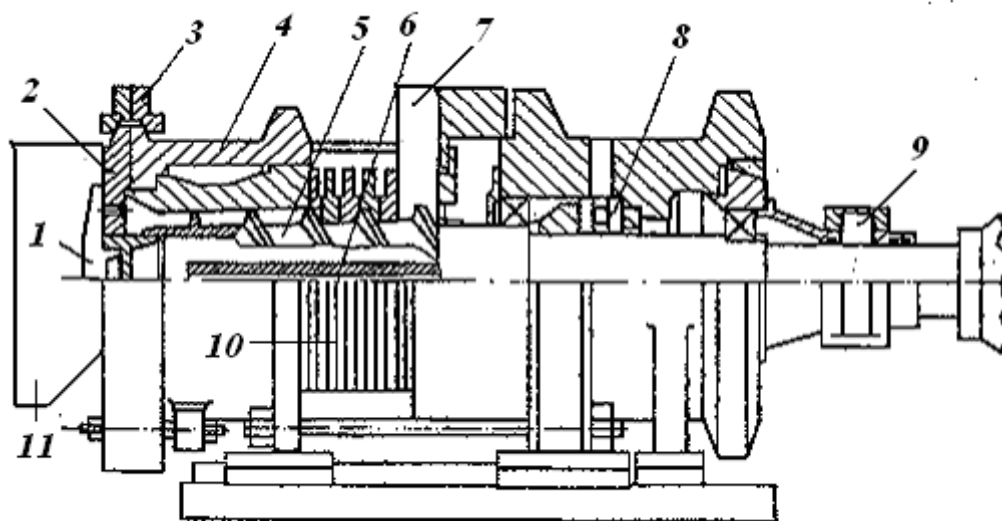


Рис.4.1, а. Схема отжимного пресса ПО-125 [6]:

1 – нож; 2 – фильера; 3 – разъемное фланцевое соединение; 4 – корпус; 5 – шнек; 6 – центральная труба системы обогрева; 7 – загрузочное окно; 8 – опорный подшипниковый узел; 9 – бокс для подачи горячей воды; 10 – фильтрующее устройство; 11 – вакуумная камера

Степень отжима регулируют изменением свободного сечения фильтрующей решетки 10, давлением в топливной массе за счет набора фильер 2 с разным проходным сечением и скоростью вращения шнека 5.

Внутренние полости шнека и корпуса пресса обогреваются горячей водой, поступающей в шнек через центральную трубу 6 и буксу 9. Силовое замыкание в конструкции пресса выполняют подшипниковый узел 8 и разъемное фланцевое устройство 3.

Физическая модель фильтрации и отжима воды в отжимном прессе показана на рис. 4.1, б [5]. Суспензия топливной массы под действием гидростатического столба жидкости в открытом бункере или за счет давления в циркуляционном массопроводе поступает по винтовому каналу в пресс и фильтруется в зоне фильтровальной решетки. Образующийся слой осадка от бункера до конца зоны фильтрации непрерывно растет, постепенно заполняя всю глубину винтового канала. Под действием давления твердая часть суспензии уплотняется и оказывает возрастающее сопротивление фильтрату.

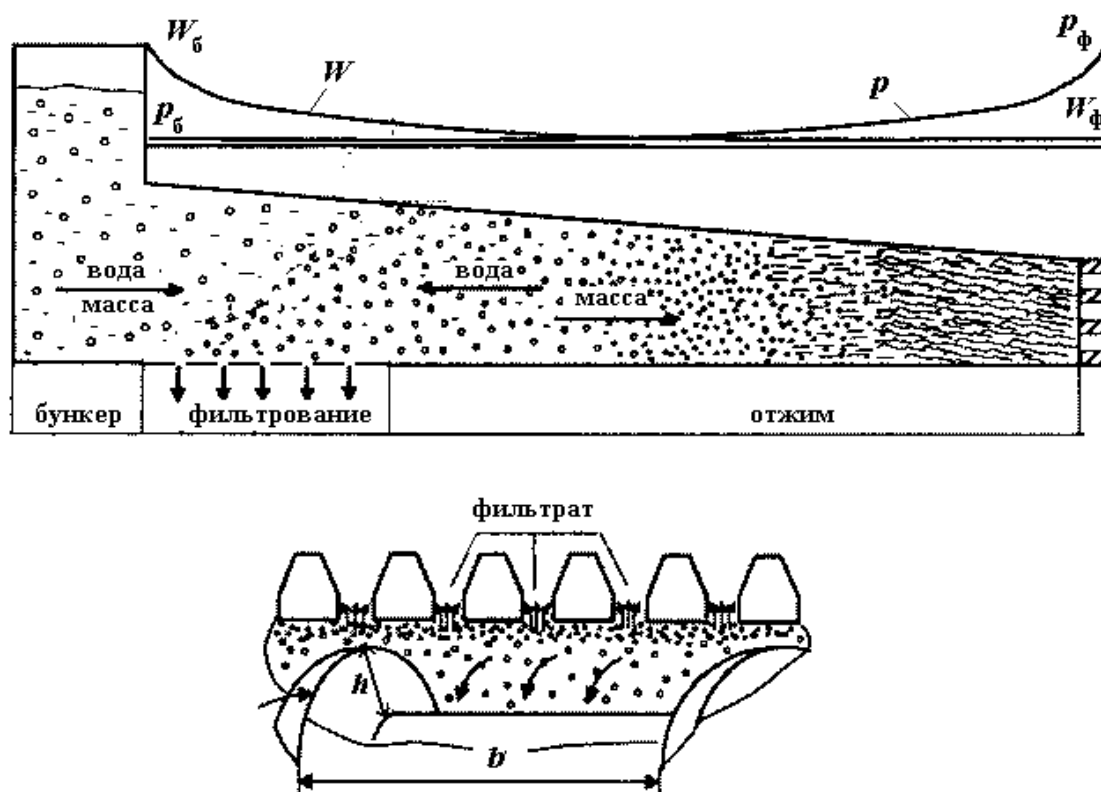


Рис.4.1, б. Физическая модель процесса фильтрации и водоотжима в шнековом отжимном прессе [5]

В закрытой части шнекового канала (зона водоотжима) топливная масса сжимается вследствие уменьшающегося сече-

ния винтового канала и сопротивления формующей втулки. Оставшаяся в топливе вода под действием значительного градиента давления движется назад в зону фильтровальной решетки (давление в бункере составляет $p_6 \approx 0,0005\text{--}0,1$ МПа, на сечении формующей втулки $p_\phi \approx 1,0\text{--}10$ МПа) [6].

В зоне фильтровальной решетки объемная скорость фильтрации W в соответствии с законом Дарси равна

$$W = \frac{dQ_v}{dt} = \frac{\Delta p S}{\mu(h_o r_o + R_{\phi p})}, \quad (4.1)$$

где Q_v – объем фильтрата, м^3 ; t – время, с; S – площадь поверхности фильтрования, м^2 ; μ – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$; h_o – высота равномерного слоя осадка, м; r_o – удельное объемное сопротивление осадка, м^{-2} ; $R_{\phi p}$ – сопротивление фильтрующей перегородки, м^{-1} .

С учетом пропорциональности объемов осадка и фильтрата толщина равномерного слоя осадка на фильтровальной решетке составит

$$h_o = x_o Q_v / S. \quad (4.2)$$

Из совместного решения уравнений (4.1) и (4.2) с учетом, что $S = \pi D l_{\phi p}$, получим следующее основное уравнение фильтрования:

$$\frac{dQ_v}{dt} = \frac{\pi D \Delta p l_{\phi p}}{\mu(r_o x_o Q_v / S + R_{\phi p})}, \quad (4.3)$$

где $l_{\phi p}$ – длина фильтрационной решетки; D – диаметр корпуса шнекового пресса.

Обычно уравнение фильтрования (4.3) рассматривают либо при постоянной скорости процесса, либо при постоянной разности давлений. Возможно также фильтрование при постоянной разности давлений и скорости процесса. Последний вид фильтрования осуществим, если чистая жидкость фильтруется сквозь слой осадка неизменной толщины при постоянной разности давлений. Для этого случая, когда величина сопротивления фильтровальной решетки $R_{\phi p}$ значительно меньше сопротивления образующегося слоя осадка, т.е. $R_{\phi p} / (h_o r_o) \ll 1$, получим следующую зависимость толщины слоя осадка h_o от объемной скорости фильтрации W :

$$h_o = \frac{\pi D \Delta p l_{\text{фр}}}{\mu r_o W}. \quad (4.4)$$

Следует отметить, что в уравнениях (4.1)–(4.4) не учитывают сжимаемость осадка и зависимость удельного сопротивления осадка от разности давлений. Кроме того, процесс фильтрования рассматривался в изотермическом приближении и не учитывалось изменение вязкости фильтрата от температуры, в то время как на практике температура может значительно колебаться в пределах 30–60 °С [6].

Поскольку процесс фильтрования протекает непрерывно, то осадок постоянно уплотняется в щелях фильтрующей перегородки пресса. При этом увеличивается удельное объемное сопротивление осадка, происходит полное замазывание фильтрующих щелей, рабочая фильтрующая поверхность S уменьшается, соответственно интенсивность фильтрования снижается. По этой причине требуются внеплановые остановки отжимного пресса для очистки щелей фильтрующей решетки.

В зоне отжима (рис.4.1, б) вода движется через слой топливной массы по направлению z канала шнека за счет градиента давления dp/dz . Объем отжимаемой воды определяют с помощью следующего уравнения [5]:

$$\frac{dQ_v}{dz} = \frac{S_{\text{ш}}}{\pi D \mu r_o(z) \text{tg} \alpha} \frac{dp}{dz}, \quad (4.5)$$

где $S_{\text{ш}}$ – поперечное сечение шнека; n – частота вращения шнека; α – угол конусности винта.

Градиент давления по оси канала шнека [6]

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\tau_1 b - \tau_2 (2h + b)}{S_{\text{ш}}}, \quad (4.6)$$

где τ_1, τ_2 – напряжение сдвига (внутреннего трения) и напряжение внешнего трения (трения скольжения) соответственно; h, b – высота и ширина винта соответственно.

Для расчетов по формулам (4.5) и (4.6) необходимо знать значения реологических характеристик влажных топливных масс при разных температурах, а также величину r_o при различной влажности и плотности топлив. Необходимые сведения о реологических и физико-механических свойствах баллиститных топлив в процессе удаления воды приведены в [5].

Выходящие из отжимного пресса влажные куски топлива измельчают в протирачном аппарате (рис. 4.2) в крошку и направляют на фазу вальцевания.

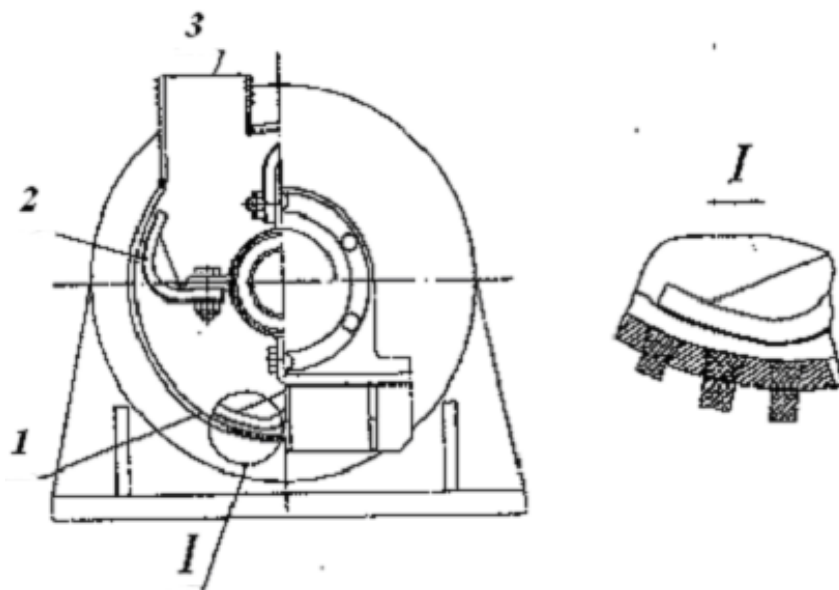


Рис.4.2. Схема протирачного барабана [8]:

1 – перфорированное днище барабана; 2 – лопасть; 3 – загрузочный бункер

4.3. Вальцевание

Технологический процесс вальцевания предназначен для гомогенизации, сушки топливной массы и окончательной (глубинной) пластификации нитроцеллюлозы. Процесс осуществляется за счет термомеханического воздействия на перерабатываемый материал при его многократном прохождении через зазор между валками.

Гомогенизация – это создание однородной структуры тела, обладающего одними и теми же свойствами и не обнаруживающего различий строения.

Конструкция вальцевого пресса. Кинематическая схема типовой вальцевой установки показана на рис. 4.3. Топливная крошка непрерывно подается в середину между холостым 2 и рабочим 11 валками, вращающимися навстречу друг другу. Профиль нарезки рифов на рабочем и холостом валках показан

на рис. 4,3, а. Внутренние объемы валков обогреваются горячей водой через гидромуфты 1; температуру рабочего валка поддерживают порядка 80–85 °С, холостого при 70–75 °С. На поверхности рабочего валка образуется «чулок» 15 из баллистического топлива, который продвигается вдоль этого валка в обе стороны и продавливается в виде шнуров через отверстия 13 в формующих кольцах 14 (рис. 4.3, б). Шнуры отрезаются дисковыми ножами 10. В результате получают таблетки топлива диаметром 8–12 мм и высотой 5–8 мм; влажность таблеток составляет 1,–3.5 %, мас.

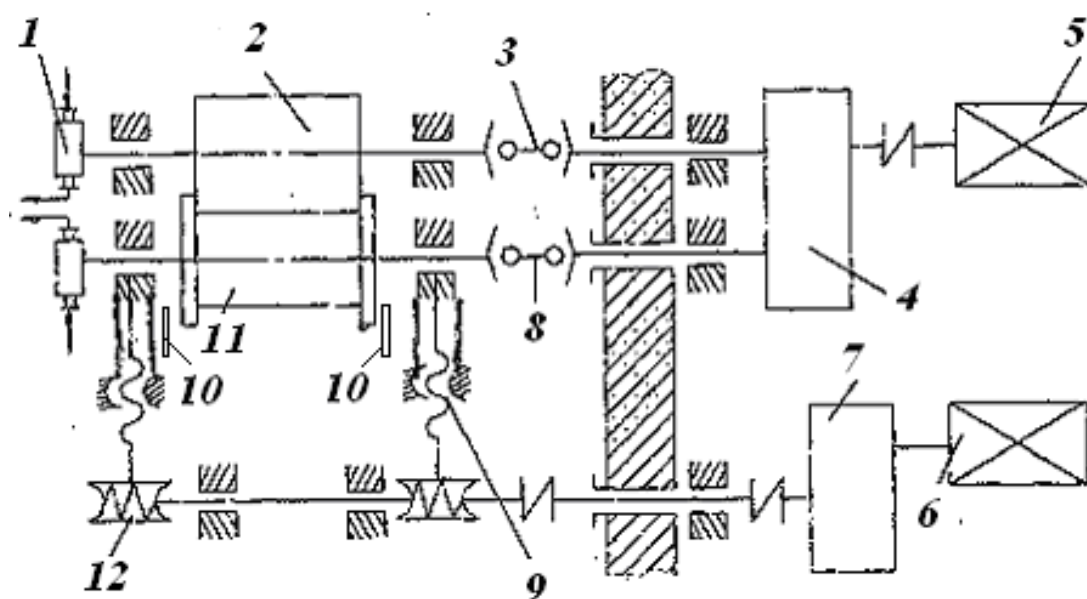


Рис. 4.3. Кинематическая схема типовой вальцевой установки [8]:
1 – гидромуфта; 2 – холостой валок; 3, 8 – шарнирные муфты; 4, 7 – цилиндрические редукторы; 5, 6 – электродвигатели; 9 – устройство винт-гайка; 10 – дисковые ножи; 11 – рабочий валок; 12 – червячный редуктор

Валки приводятся во вращение через шарнирные муфты 3 и 8, редуктор 4 от электродвигателя 5 постоянного тока, позволяющего плавно менять частоту их вращения. Зазор между валками регулируют с помощью двух механизмов типа винт-гайка 9 и червячную пару 12, вращение которых обеспечивает электродвигатель 6 и редуктор 7. Предел регулировки зазора между валками составляют 1–10 мм.

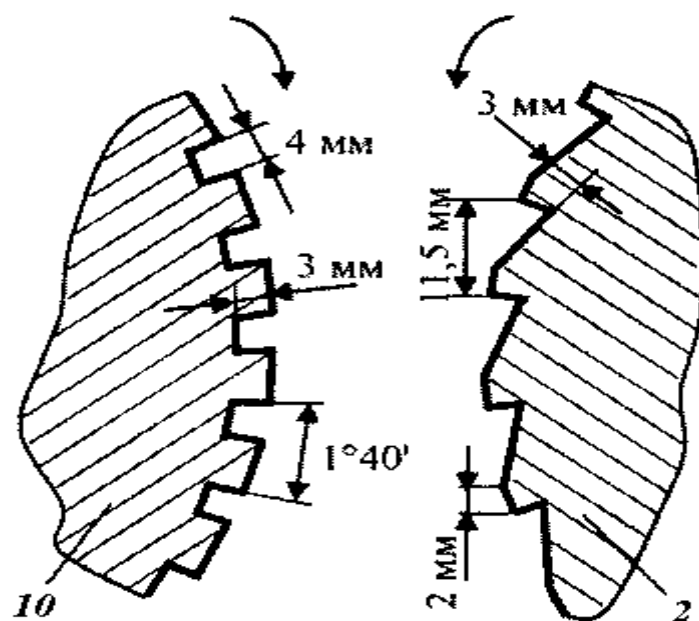
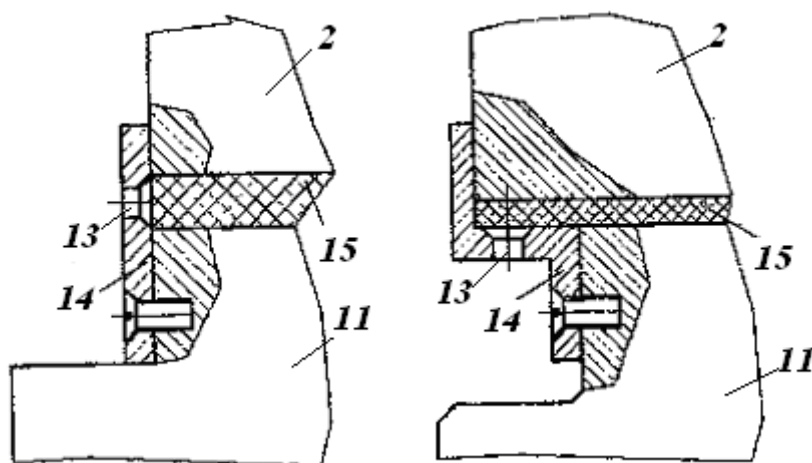


Рис.4.3, а. Профиль нарезки рифов на рабочем (10) и холостом (2) валках диаметром 550 мм



*Рис.4.3, б. Варианты крепления формирующих колец [5]:
1 – холостой валок; 10 – рабочий валок; 13 – отверстия;
14 – формирующее кольцо; 15 – топливная масса*

Продвижение материала по рабочему, а не по холостому валку обеспечивается различным профилем продольных рифов на их поверхности – прямоугольной формы на рабочем валке и острозубых – на холостом валке (см. рис. 4.3, а). Кроме того, температура обогрева рабочего валка на 20–15 °С выше, чем холостого валка.

За счет многократного пропускания топливной массы через зазор между валками и повышенной температуры термопластичное баллиститное топливо переходит в вязкотекучее состояние и подчиняется закону течения неньютоновских псевдопластичных жидкостей.

Параметрический расчет работы вальцевого прессы. Поведение топливной массы в зазоре между вращающимися валками подчиняется закономерностям деформирования неньютоновских высоковязких сред и описывается следующими реологическими уравнениями:

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \text{ или } \tau = \mu_{\text{эф}} \dot{\gamma}, \quad (4.7)$$

где τ – напряжение сдвига; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига; n, k – реологические коэффициенты; $\mu_{\text{эф}} = k \dot{\gamma}^{n-1}$ – кажущаяся вязкость среды.

На основании гидродинамической теории вальцевания неньютоновской жидкости получены следующие уравнения для расчета основных параметров процесса вальцевания.

Распорное усилие P определяется по формуле

$$P = 2 \frac{\mu_{\text{эф}} V R L \alpha}{h_0}, \quad (4.8)$$

где $\mu_{\text{эф}} = k \left(\frac{2V}{h_0} \right)^{n-1}$; V – линейная скорость вращения валков; R, L – радиус и рабочая длина валков соответственно; h_0 – минимальный зазор между валками; α – угол захвата, $\alpha \approx 0,35\text{--}0,70$ рад.

Следует отметить, что приведенные формулы для определения распорного усилия и мощности дают приближенные значения рассчитываемых величин. При непрерывном вальцевании с образованием «чулка» происходит не только кольцевое, но и осевое движение материала по направлению к формирующим кольцам. Давление по длине валка меняется. Максимальная его величина приходится на зону загрузки новых порций крошки топлива и по мере течения материала к торцам рабочего валка давление падает до величины, необходимой для продавливания массы через формирующие отверстия колец.

Пропускная способность вальцев, работающих в непрерывном режиме, при однократном проходе материала через зазор без образования «чулка», определяется по формуле

$$G_{\Pi} = 2\pi RLh_0 n \rho, \quad (4.9)$$

где n – скорость вращения валков, об/мин; ρ – плотность материала в сечении минимального зазора.

Технологическая производительность валков связана с набором «чулка» и пропускной способностью формующих колец и требуемой длины гранул l_{Γ} и определяется как

$$G_{\Gamma} = 2m l_{\Gamma} F_{\text{от}} n, \quad (4.10)$$

где m – число отверстий в формующем кольце; $F_{\text{от}}$ – площадь одного отверстия.

Соотношение между пропускной способностью G_{Π} и технологической производительностью G_{Γ} вальцев может служить показателем интенсивности процесса переработки поступающего материала, и для случая вальцевания баллиститных порохов и ракетных топлив обычно составляет величину порядка $G_{\Pi}/G_{\Gamma} \approx 20\text{--}40$.

Мощность, затрачиваемая на технологическую работу вальцевого пресса, определяется по уравнению

$$N = (M_p + M_{\text{тр}}) \omega, \quad (4.11)$$

где $M_p = 2PR \sin(\alpha/2)$ – момент сопротивления деформации материала; $M_{\text{тр}} = f(P + G)d$, f – коэффициент трения в подшипниках; G – сила тяжести вала; d – диаметр цапфы вала.

Мощность электродвигателя вальцевого пресса достигает максимальной величины только на короткое время (около 2–3 мин). Поэтому мощность устанавливаемого электродвигателя при коэффициенте перегрузки, равном 2, может быть в 1,5–2 раза меньше, чем мощность, определенная по формуле (4.11).

Физико-химические основы процесса сушки при вальцевании. Проходя зазор между валками, топливная масса многократно подвергается интенсивному воздействию давления и сдвиговым деформациям при повышенной температуре за счет выделения значительного количества теплоты. Под действием этих факторов в перерабатываемом материале происходят сложные физико-химические процессы, связанные с окончательной пластификацией НЦ, удалением влаги (сушкой), смешением компонентов, их структурированием и гомогенизацией.

Экспериментальные кинетические кривые процесса сушки различных баллиститных топлив показывают, что скорость сушки определяется не только диффузией влаги внутри мате-

риала (*термодиффузией*), но и испарением и переносом влаги с поверхности материала в окружающую среду через пограничный слой, расположенный у поверхности материала [5].

Интенсивность испарения влаги с поверхности высушиваемого материала в окружающую среду зависит от разности парциальных давлений пара p_m в пограничном слое вблизи поверхности высушиваемого материала и окружающей среды p_n .

Давление водяного пара над высушиваемым материалом p_m зависит от влажности материала, температуры и характера связи влаги с материалом. С ростом влажности материала и температуры значение p_m увеличивается. Зависимость давления пара влаги над поверхностью материала от его влажности определяется типом связи влаги с материалом.

Различают следующие формы связи жидкости с твердым материалом (в порядке убывания величины энергии связи):

- *Химически связанная жидкость* представляет собой воду гидрата, прочно связанную с твердым веществом в виде гидроксильных ионов (ионная связь), и воду молекулярных соединений типа кристаллогидратов, связанную слабее (молекулярная связь).

- *Физико-химические* адсорбционная и осмотическая связи. Адсорбционная связанная влага образуется за счет адсорбции молекул пара из окружающей газовой среды под действием молекулярного силового поля на наружной поверхности материала и на поверхности его пор. На поверхности твердого тела образуется мономолекулярный слой адсорбированной влаги (гидратная оболочка), который связывается наиболее сильно. Последующие слои связанной жидкости (полимолекулярная адсорбция) удерживаются менее прочно, а свойства ее постепенно приближаются к свойствам свободной жидкости. Адсорбционная связь влаги с сухим веществом характеризуется энергией связи средней интенсивности.

Осмотическая связанная влага находится внутри структурного скелета твердых частиц и удерживается осмотическим давлением, обуславливающим избирательную диффузию жидкости из окружающей среды через полупроницаемую оболочку. Осмотическая связь характеризуется энергией связи слабой интенсивности.

- *Физико-механические* связи определяются жидкостью, находящейся в порах и капиллярах материала, и жидкостью смазывания на поверхности твердых частиц. Такие жидкости механически связаны с материалом и наиболее легко удаляются.

Влажность материала, отвечающая условиям $p_m = p_n$, соответствует достижению динамического равновесия, когда процесс сушки не идет.

Условию сушки, т.е. диффузионному переносу влаги из твердого материала в окружающую среду, будет соответствовать неравенство $p_m > p_n$.

Таким образом, разность $(p_m - p_n)$ может трактоваться как одно из выражений движущей силы процесса сушки. В зависимости от знака этой движущей силы влага может переноситься от твердого тела в окружающую среду или в обратном направлении – из окружающей среды в твердое тело.

Если $(p_m - p_n) > 0$, то происходит диффузия влаги из влажного материала, а само неравенство есть условие сушки.

Из изложенного следует, что для процесса сушки твердого материала необходимо создать и поддерживать в технологическом аппарате условие $p_m > p_n$.

Поэтому в современных технологиях переработки БТРТ на фазе вальцевания предусматривается:

- использование щелевых отверстий в торцевых кольцах рабочего вала для получения таблеток толщиной 4 мм, что снижает тормозящий эффект термодиффузии при сушке;
- осуществлять обдув материала сухим воздухом с температурой 50–80 °С.

Обдув топливного «чулка» при вальцевании с целью интенсификации процесса сушки особенно актуален в случае ввода на фазе вальцевания растворимых в воде компонентов (например KNO_3) в топливную композицию.

При длительном вальцевании в топливной массе могут начаться нежелательные процессы деструкции, денитрации, окисления. Поэтому целесообразно проводить сопутствовавший процесс сушки до влажности 1,5–2,0 % мас., а оставшуюся влагу удалять в сушильных аппаратах. При вальцевании до окончательной влажности топлива 0,1–0,2 % мас. возможны вспышки на вальцах, особенно для наполненных композиций.

4.4. Сушка

Окончательное досушивание баллиститного топлива осуществляют в сушильных аппаратах, которые по способу подвода тепловой энергии классифицируют на следующие виды:

- *конвективные сушилки* и агрегаты; в них высушиваемый материал непрерывно контактирует с потоком нагретого газа. Такой механизм передачи теплоты осуществляется в сушилках барабанного типа, сушилках с виброожиженным слоем материала и других;
- *контактные сушилки*, в которых тепловая энергия от теплоносителя к высушиваемому материалу передается через разделительную металлическую стенку, например в шнековых сушилках.

В качестве конвективных сушилок используют сушильные аппараты с продольной и поперечной продувкой горячего воздуха.

Принципиальная схема сушилки с продольной продувкой горячего воздуха показана на рис. 4.4.

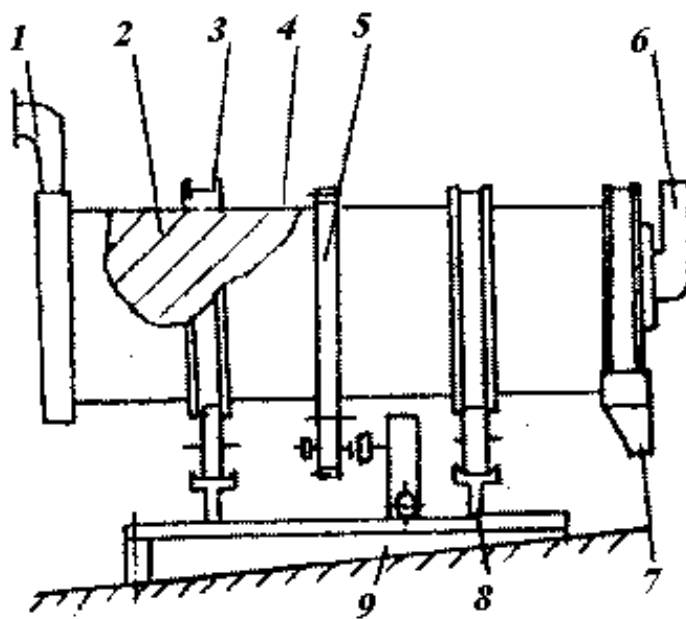


Рис.4.4. Сушильный аппарат с продольной продувкой горячего воздуха [6]:

1 – приемная камера; 2 – спиральные лопасти; 3 – бандаж; 4 – барабан; 5 – зубчатое колесо; 6 – диффузор; 7 – приемный бункер; 8 – опорно-упорная станция; 9 – привод

Она состоит из барабана 4, внутри которого располагаются специальные лопасти 2, обеспечивающие перемещение и пересыпку топлива. Топливные таблетки через загрузочный бункер 1 подаются внутрь сушильного барабана, продвигаются вдоль него и подвергаются воздействию встречного потока горячего воздуха, который поступает в сушилку через диффузор 6 и удаляется в приемной камере 1.

Высушенная топливная таблетка покидает барабан через выгрузной бункер 7. Барабан вращается на двух упорных кольцах (бандажах) 3, установленных на двух опорно-упорных роликах 8. Вращение барабана осуществляется от привода 9 через зубчатое колесо 5, надетое на барабан сушилки.

Схема сушилки с поперечной продувкой горячего воздуха показана на рис. 4.5; она имеет меньшую длину, более компактна и производительна.

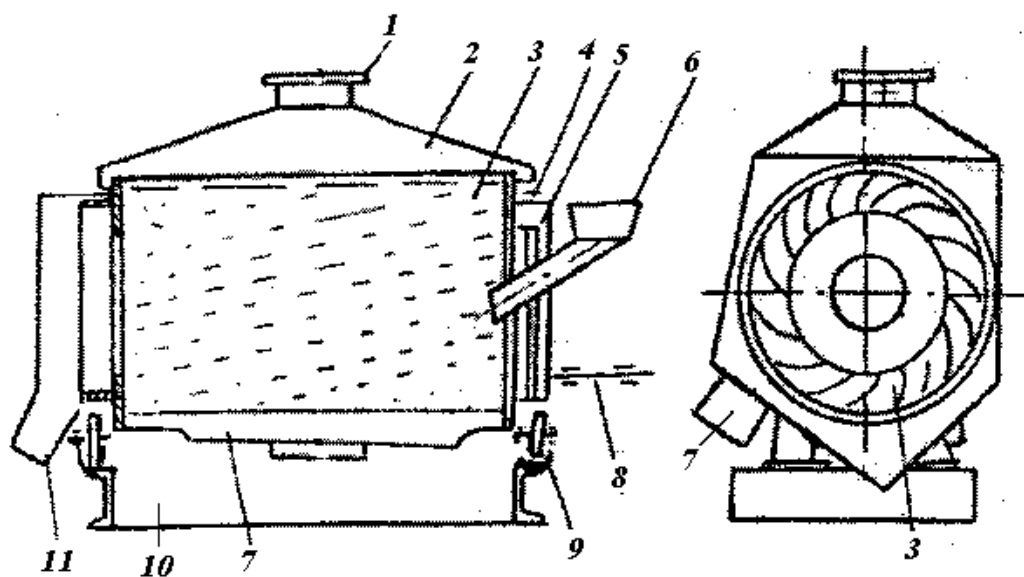


Рис. 4.5. Сушильный аппарат с поперечной продувкой горячего воздуха [6]:

1 – патрубок; 2 – приемная камера; 3 – барабан; 4 – опорное колесо; 5 – зубчатая передача; 6 – воронка; 7 – диффузор для подачи воздуха; 8 – приводной вал; 9 – опорные катки; 10 – опорная рама; 11 – выпускной патрубок

Сушилка состоит из барабана 3, формируемого из полос – лопастей желобчатого типа, в зазоры между которыми проходит горячий воздух. Барабан вращается с помощью колец 4,

привариваемых к его торцевым стенкам, и опирается на опорные катки 9, установленные на раме 10. Барабан вращается от электродвигателя через приводной вал 8 с зубчатой передачей 5. Барабан помещен в металлический корпус с нижним диффузором для подачи горячего воздуха 7 и верхней приемной камерой 2 и выходного патрубка 1.

В процессе сушки топливная таблетка из воронки 6 поступает внутрь барабана 3, где захватывается лопастями, поднимается вверх и сыпается вниз. В это время она интенсивно обдувается горячим воздухом. Высушенная таблетка через выпускной патрубок 11 поступает в приемный бункер.

Опыт эксплуатации барабанных сушилок показал, что интенсивное воздействие горячего воздуха на топливную таблетку приводит к некоторому улетучиванию НГЦ, что нежелательно с учетом экологии и требования сохранения постоянства состава.

В контактных сушилках шнекового типа создаются более мягкие режимы сушки. Сушилки этого типа представляют собой набор секций из отдельных шнековых транспортеров, имеющих рубашку для обогрева горячей водой. Отдельная секция шнековой сушилки, из которой собирают сушильные агрегаты, изображена на рис.4.6.

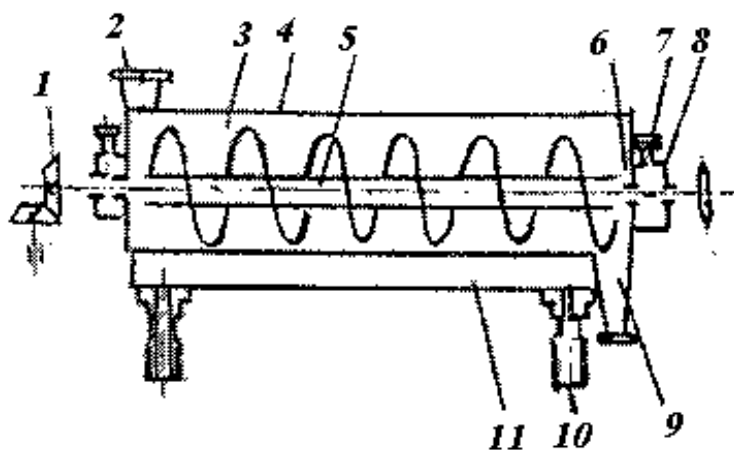


Рис. 4.6. Секция шнековой сушилки [6]:

1 – коническая передача; 2 – загрузочный патрубок; 3 – корпус шнека;
4 – крышка; 5 – шнек; 6 – сальник; 7 – масленка; 8 – подшипниковый узел;
9 – выходной патрубок; 10 – штуцер для подачи горячей воды;
11 – рубашка

Она состоит из корпуса 3, закрытого крышкой 4, имеет обогревающую рубашку 11, в которую через штуцер 10 подается горячая вода. Внутри корпуса вращается шнек 5, закрепленный на валу в подшипниковых опорах 8 с масленками 7. Места прохода вала через торцевые стенки уплотняются сальниками 6. Привод шнека осуществляется через коническую передачу 1; для соединения с другой секцией служит цепная передача.

Топливную таблетку подают в корпус шнека через патрубок 2, она подсушивается и удаляется через патрубок 9.

Наиболее широко в производстве БТРТ используют шнековые сушилки каскадного типа (рис.4.7).

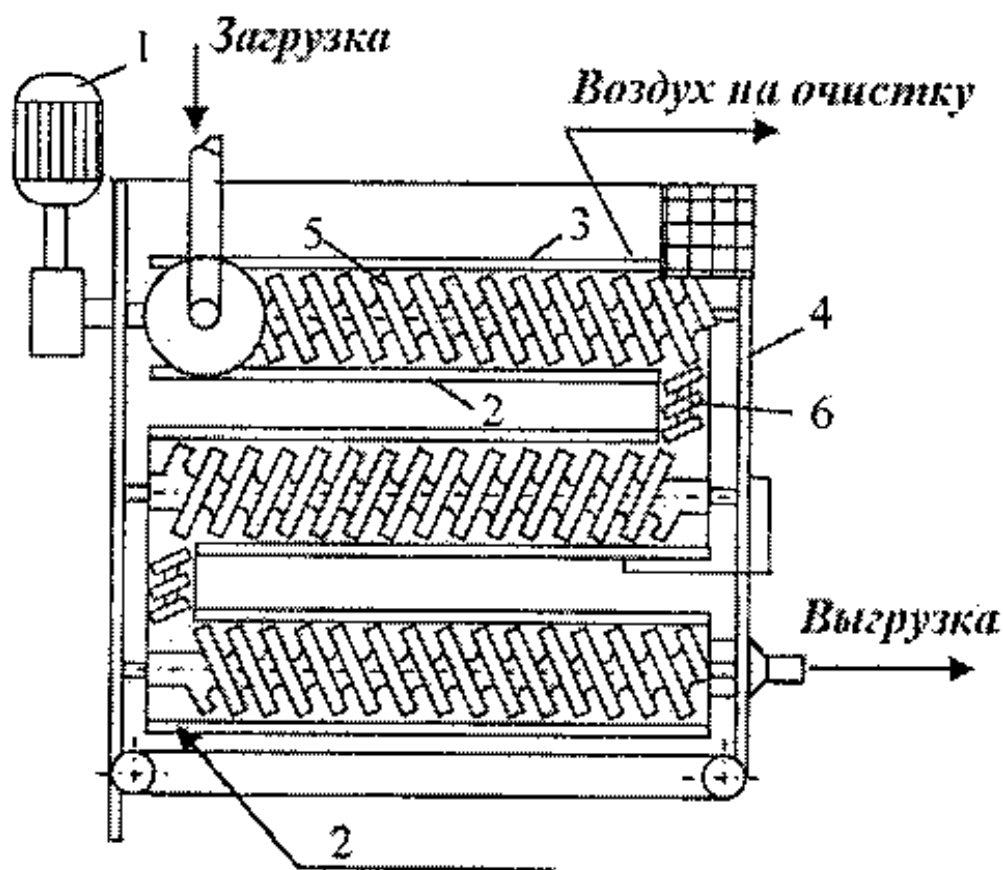


Рис.4.7. Сушилка СШТС [5]:

- 1 – управляемый привод; 2 – система нагнетания нагретого воздуха;*
- 3 – система направления воздуха на очистку; 5 – секции сушилки;*
- 6 – межсекционные перегружатели*

Сушилка СШТС имеет систему регулирования параметров сушки в поверхностном слое таблеток потоком воздуха с изменяющейся температурой и влагосодержанием. За счет интенсификации процесса испарения влаги с поверхности топливных таблеток сокращается время сушки или при прочих равных условиях повышается производительность до 1000 кг/ч.

Использование в процессе сушки вакуума (элементы вакуумной сушки) позволяет в ряде случаев сократить продолжительность высушивания материала до окончательной влажности.

Контрольные вопросы

1. Назовите формы связи жидкости с твердыми материалами. Охарактеризуйте их особенности.

2. Дайте характеристику физико-механическим процессам фильтрования и отжима воды в шнековых прессах.

3. Назовите основные физико-химические процессы, происходящие на фазе вальцевания баллиститного топлива.

4. Дайте обоснование используемым методам расчета основных технологических параметров работы вальцевых прессов.

4. Сформулируйте необходимые условия для осуществления процесса сушки твердых тел.

5. Назовите основные типы сушильных агрегатов, используемых в производстве БТРТ.

Глава 5. ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БАЛЛИСТИТНЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ [5–8]

5.1. Общая характеристика процессов при проходном шнековании

На технологической фазе формования топливные таблетки превращаются в монолитные шашки-заготовки для ракетных зарядов. Этот физико-механический процесс связан с явлениями аутогезионного и когезионного взаимодействия между частями формуемого материала.

Аутогезия – всестороннее сжатие термопластичных таблеток баллиститного топлива при повышенной температуре.

Когезия – сдвиг слоев баллиститного топлива при повышенной температуре и действии всестороннего давления.

За счет аутогезии разрозненные таблетки топлива превращаются в плотную гетерогенную структуру, но внутри которой остаются границы раздела деформированных элементов топлива.

За счет когезионного сдвига эта граница исчезает, превращая топливо в однородную структуру.

В отсутствии хотя бы одного из двух физико-механических явлений или неполного их проявления невозможно получить качественное изделие. Для одновременного осуществления процессов аутогезии и когезии используют технологический прием – *экструзию*.

Экструзия – выдавливание материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, из большого объема в меньший через канал профилирующего инструмента. Получаемое изделие имеет форму внутреннего очертания профилирующего инструмента.

В производстве изделий из баллиститных ракетных топлив этот процесс обычно называют проходным прессованием. В зависимости от свойств перерабатываемого продукта шнековые машины имеют различные конструктивные решения, но общим для них является наличие основного узла – вращающегося шнека (винта) в неподвижном корпусе. Принцип действия одношнекового формующего пресса заключается в следующем (рис. 5.1).

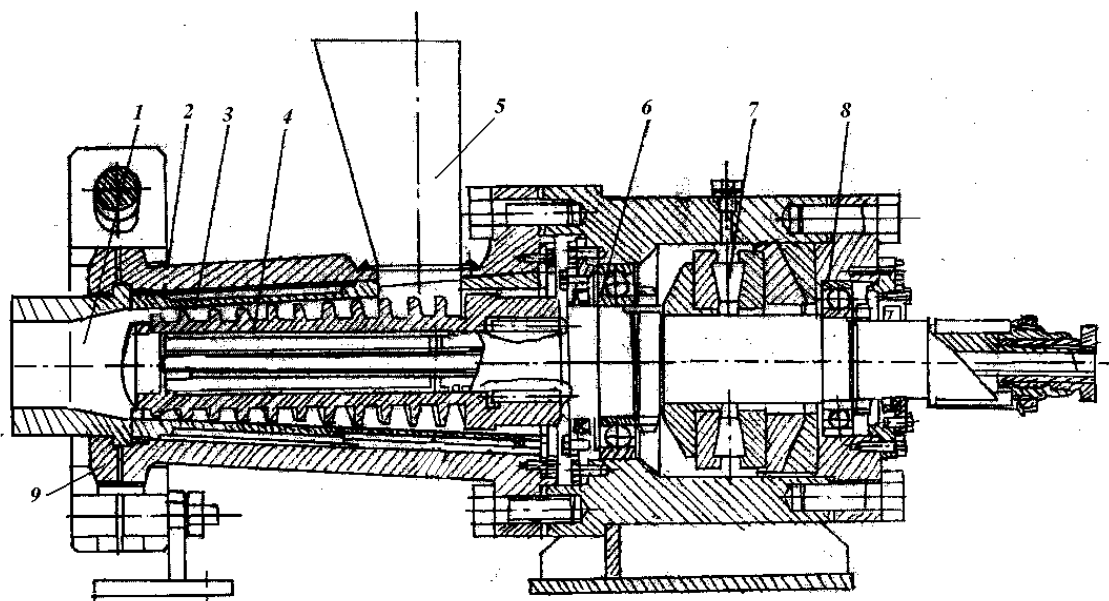


Рис. 5.1. Принципиальная схема шнек-пресса:

1 – формующий инструмент; 2 – корпус; 3 – втулка; 4 – шнек; 5 – бункер; 6, 8 – радиальные подшипники; 7 – упорный подшипник; 9 – хомут

Топливные гранулы (таблетки) при температуре $75\text{--}85\text{ }^{\circ}\text{C}$ поступают в загрузочный бункер пресса 5, откуда под действием собственного веса перемещаются в *загрузочную зону* и захватываются витками шнека 4, который вращается в неподвижной втулке 3 и установлен в опорном узле корпуса пресса 2. Опорный узел имеет два радиальных 6, 8 и упорный 7 подшипники. Через внутренние полости шнека 4, втулки 3 и корпуса 2 прокачивается вода температурой $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для поддержания требуемого температурного режима в рабочих зонах шнек-пресса.

В загрузочной зоне гранулы заполняют объем между витками вращающегося шнека и поверхностью неподвижного корпуса и начинают перемещаться по направлению к выходной части пресса, где находится пресс-инструмент 1, соединенный с корпусом хомутом 9. Степень заполнения объема витков шнека топливными гранулами является важным технологическим параметром. Она зависит от насыпной массы гранул, их сыпучести, определяемой внутренним трением между частицами и конструктивными параметрами пресса в зоне загрузки. Очевидно, чем меньше глубина винтовой нарезки и отношение

наружного диаметра винта к внутреннему (диаметру сердечника) в зоне загрузки, тем хуже условия заполнения объема между витками шнека. Кроме того, вращение шнека, увеличивающее степень заполнения, создает одновременно условия неравномерного его заполнения. С одной стороны, набегающие реборды (выступы) винта увлекают гранулы внутрь пресса, с другой, напротив, выталкивают гранулы наружу. Давление со стороны шнека на гранулы, необходимое для перемещения их в этой небольшой по длине зоне, мало, так как обуславливается в основном лишь силами внешнего трения материала о поверхность шнека и корпуса, как при обычном транспортировании сыпучих материалов винтовыми конвейерами.

Работа загрузочной зоны в результате колебаний производительности и неравномерного заполнения шнека материалом влияет на основные параметры процесса прессования: градиент давления в напорной зоне, тепловой разогрев топлива и потребляемую энергию.

Дальнейшее перемещение гранул происходит *в переходной зоне*, где движение материала начинает интенсивно замедляться за счет сопротивления, создаваемого в выходной зоне пресса. Продвигаясь вдоль винтового канала шнека, топливная масса уплотняется под действием возрастающего давления и образует более плотную упаковку. В конце переходной зоны возникает объемное давление сжатия, достаточное для пластической деформации и начального объединения гранул по поверхностям соприкосновения. При этом материал уже представляет собой монолитную массу, но в которой еще сохраняются видимые границы между деформированными гранулами, характерные для аутогезионного процесса.

Для улучшения условий захвата гранул в загрузочной зоне и сокращения длины переходной зоны, конструкцию шнека выполняют с уменьшенным объемом витков от места загрузки к выходной части пресса. Отношение полезного объема витка шнека загрузочной зоны к рабочему объему последнего формующего витка называется *коэффициентом сжатия витков шнека* ψ ; например, в конструкции пресса ПСВ $\psi = 2,0\text{--}2,1$. В этом случае давление на массу по мере ее движения в переходной зоне возрастает быстрее, так как кроме сопротивления

формующего инструмента проявляется действие сил, обусловленных объемным сжатием топливной массы в винтовом канале уменьшающего сечения. В результате длина переходной зоны становится меньше.

Последующее движение материала в винтовом канале шнек-пресса сопровождается еще большим возрастанием давления и интенсивных сдвиговых деформаций. В последних 2–3 витках шнека начинается течение массы как высоковязкой жидкости. В этой зоне, называемой *формующей* или *зоной течения*, за счет интенсивных сдвиговых усилий и высокого давления осуществляется процесс *когезии*, что обеспечивает получение требуемых физико-механических и технологических свойств готового изделия.

Деление шнек-пресса на три зоны в известной мере условно, так как четкую границу между ними провести трудно, но общая картина поведения материала и происходящие при этом деформационные процессы дают достаточно правильное представление о принципе работы шнековых машин при формировании термопластичных баллиститных топлив.

Конструкция шнек-пресса и формующего инструмента зависит от заданных параметров технологического режима переработки и физико-механических свойств топлива, поведение которого нужно рассматривать применительно к каждой из рабочих зон пресса. Для движения и уплотнения массы топлива в загрузочной и промежуточной зоне необходимо, чтобы силы внешнего трения ее о неподвижную втулку были бы больше сил трения, возникающих между поверхностью витков шнека и материалом. Если эти условия не соблюдаются, то топливная масса начинает вращаться вместе со шнеком, не перемещаясь к выходной части пресса, и полезная работа машины практически будет невозможна. С целью увеличения сил сцепления материала с втулкой корпуса на ее внутренней поверхности делают продольные углубления (рифлы), которые препятствуют вовлечению массы во вращательное движение вместе со шнеком. Для снижения сил внешнего трения, возникающих между шнеком и топливной массой, проводится тщательная механическая обработка рабочих поверхностей винтовой нарезки шнека.

5.2. Формование изделий в раструбном пресс-инструменте

Для получения крупногабаритных ракетных заготовок, как правило, цилиндрической формы с каналами различной конфигурации применяют раструбный пресс-инструмент. Его устанавливают на выходе из формующего шнек-пресса (рис. 5.2).

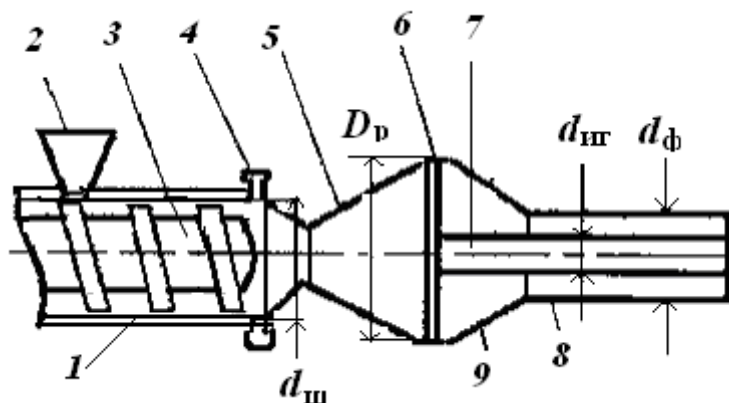


Рис. 5.2. Принципиальная схема формующего шнекового пресса с раструбным пресс-инструментом [7]:

1 – корпус пресса; 2 – загрузочный бункер; 3 – шнек; 4 – хомут;
5 – диффузор; 6 – иглодержатель; 7 – игла; 8 – формующая втулка;
9 – конфузор

Такой пресс-инструмент позволяет изготавливать изделия, диаметр которых превосходит диаметр выходного сечения шнек-пресса $d_{\text{ш}}$. Пресс-инструмент содержит расширяющуюся часть – диффузор 5 с максимальным диаметром D_p и сужающуюся часть – конфузор 9, соединенный с формующей втулкой 8 диаметром $d_{\text{ф}}$. По оси пресс-инструмента в иглодержателе 6 расположена игла 7, с помощью которой формируется канал изделия диаметром $d_{\text{иг}}$ (для цилиндрического канала). Пресс-инструмент соединен с корпусом пресса разъемным хомутом 4. Непрерывно выходящую из формующей втулки шашку периодически обрезают гильотинным ножом на заготовки нужной длины.

Сдвиговые деформации топливной массы в пресс-инструменте создаются за счет продавливания материала из канала большего поперечного сечения диаметром D_p в кольцевой канал меньшего сечения с зазором $(d_{\text{ф}} - d_{\text{иг}})$. Происходя-

щую сдвиговую деформацию перерабатываемого материала в пресс-инструменте можно оценить так называемым коэффициентом вытяжки K_v с помощью следующего выражения:

$$K_v = \sqrt{\frac{D_p^2}{d_{\phi}^2 - d_{иг}^2}}. \quad (5.1)$$

В случае изготовления цилиндрических бесканальных изделий

$$K_v = D_p / d_{\phi}. \quad (5.2)$$

Величина K_v может изменяться от 1,2 до 10 [5]. Для прес-сов с диаметром шнека $d_{ш} = 300\text{--}350$ мм максимальный диаметр изделия может достигать 800–850 мм.

При формовании крупногабаритных зарядов с увеличением их диаметра возрастает время пребывания массы в раструбном пресс-инструменте. Относительно высокая температура топливной массы (около 100°C) может привести к взрыву из-за недостаточной термостабильности и низкой теплопроводности баллиститных ракетных топлив. Это одна из важных причин, ограничивающая максимальный диаметр зарядов до 1000 мм, изготавливаемых по технологии проходного прессования.

5.3. Реологические свойства баллиститных топлив

При определении основных технологических параметров работы шнековых прессов необходимо знать тип вязких жидких систем, к которому относятся баллиститные топлива в условиях движения в винтовом канале шнека формирующей зоны и каналах пресс-инструмента. Другими словами, должны быть известны или специально определены реологические параметры перерабатываемого материала в тех температурных интервалах градиентов скоростей сдвига, в пределах которых осуществляется работа шнек-пресса и в зоне течения, и в формирующем инструменте.

В реальном диапазоне скоростей сдвига

$$\dot{\gamma} = k\tau^n, n > 1; \quad (5.1)$$

где k – коэффициент консистенции; n – индекс течения (степень отклонения от ньютоновского течения).

Значения k и n зависят от температуры и с ее увеличением в пределах 70–90 °С величина n , как правило, несколько снижается, а величина k существенно возрастает (на 6–7 порядков). В интервале температур 80–90 °С для большинства штатных составов баллиститных топлив реологические параметры по величине соответственно составляют: $n \sim 4,0\text{--}6,0$; $k \sim 10^{-8}\text{--}10^{-6}$.

При $n = 1$ и $k = 1/\mu$ (μ – коэффициент динамической вязкости) уравнение (5.1) соответствует течению ньютоновской жидкости.

Движение баллиститной топливной массы в канале шнека и пресс-инструмента сопровождается пристенным скольжением и возникающими силами внешнего трения. Установлено [5], что внешнее трение целесообразно характеризовать удельной силой внешнего трения $\tau_{\text{тр}}$, Н/м². В интервале давлений 10–30 МПа величина удельного внешнего трения относительно слабо зависит от давления и для большинства штатных ракетных топлив составляет $(2\text{--}5) \cdot 10^5$ Па, но существенно уменьшается с повышением температуры. Величина $\tau_{\text{тр}}$ зависит от состава топлива, природы поверхности скольжения и условий ее обработки; она возрастает при увеличении скорости скольжения для всех известных топлив и во всем исследуемом диапазоне давлений.

5.4. Производительность шнековых прессов

Проведенный качественный анализ закономерностей деформирования топливной массы в винтовом канале процесса проходного шнекования показал, что шнековый пресс для переработки баллиститного топлива можно рассчитывать как винтовой насос для выдавливания высоковязкой жидкости, к которому присоединены машина для транспортировки твердых пластичных частиц и машины для аутогезионного и когезионного воздействия на них.

Действительно, в любом случае при правильно работающей загрузочной зоне шнек создает напор в потоке материала, заполняющего канал нарезки шнека. Однако на величину дав-

ления влияют не только работа загрузочной зоны, но и процессы, происходящие в средней (переходной) и формующей (течения) зонах.

Напор потока материала, особенно величина максимального давления, зависит от совокупности целого ряда факторов: реологических свойств перерабатываемого материала, характеристики шнека, сопротивления формующего пресс-инструмента, параметров технологического процесса (температуры, скорости вращения шнека и т.п.).

Эксплуатационные качества шнекового пресса можно определить, если проанализировать работу каждой из зон и рассмотреть совокупность полученных результатов.

Производительность загрузочной зоны пресса рассчитывают как объемный расход винтовых транспортеров

$$G = k_3 \frac{\pi(D_H^2 - D_B^2)}{4} (\pi D_{cp} \operatorname{tg} \varphi - me)n\gamma_n, \quad (5.3)$$

где D_H , D_B – наружный и внутренний диаметры шнека в зоне загрузки; $D_{cp} = (D_H + D_B)/2$; e , m , φ – соответственно ширина, число заходов и угол подъема винтовой нарезки шнека; n – скорость вращения шнека (об/с); γ_n – насыпная плотность перерабатываемого материала; k_3 – коэффициент подачи.

Коэффициент подачи характеризует отклонение фактической производительности от теоретически возможной и определяется экспериментально для каждого конкретного вида топливной таблетки (гранулы); для штатных составов баллистических топлив $k_3 \approx 0,75\text{--}0,85$.

Производительность формующей зоны пресса. Зона течения топливной массы является определяющей для выявления геометрических, кинематических и силовых параметров шнека и пресса в целом, так как основной определяющий когезионный процесс происходит на этом участке шнека. Здесь создаются давления для преодоления гидравлического сопротивления формующего инструмента и образования качественного изделия заданной формы и размеров. Характер движения топливной массы в зоне течения зависит от ее реологических свойств и способности прилипать или скользить по поверхности шнека и втулки пресса.

Суммарный объемный расход материала Q при его формировании в шнек-прессе складывается из прямого потока Q_d (производительность пресса без противодействия) и потоков, снижающих производительность пресса: обратного Q_p (под действием градиента давления) и утечек Q_δ (в зазоре между ребрами винта и рифами втулки) (рис. 5.3).

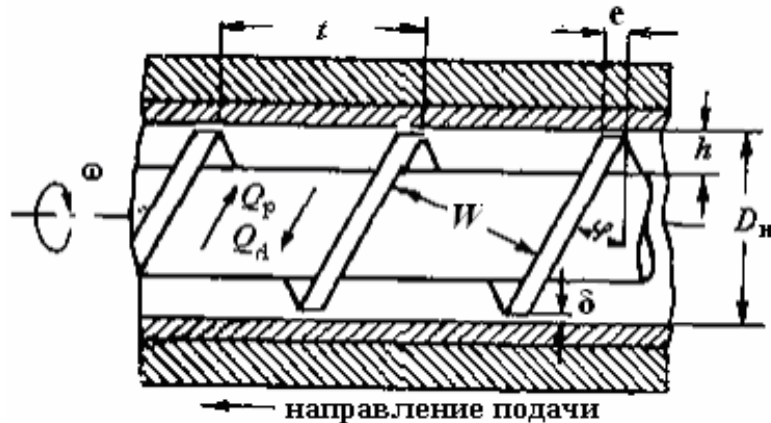


Рис. 5.3. Расчетная схема зоны формирования (течения) шнек-пресса

Прямой поток Q_d зависит только от конструктивно-технологических параметров; потоки Q_p и Q_δ зависят, помимо конструктивно-технологических параметров, также и от реологических характеристик формируемой топливной массы. При небольших зазорах между гребнем винта и рифами 3,5 мм в работающих прессах величина Q_δ составляет 1–2% от расхода прямого потока и обычно не учитывается при определении производительности пресса [5].

Следует отметить, что учет величины Q_δ необходим при расчете потребляемой мощности пресса (потребляемой мощности шнекования) и диссипативного разогрева топлива в канале шнека.

Для стационарного ламинарного изотермического течения псевдопластичных материалов, подчиняющихся степенному реологическому уравнению, зависимость объемного расхода от перепада давления по длине формирующей зоны шнека, называемая характеристикой шнека, имеет следующий общий вид:

$$Q = A\omega - \frac{hWk}{B(n+1)} \left[h(\tau_{BH} + Bh)^{n+1} - \frac{(\tau_{BH} + Bh)^{n+2} - \tau_{BH}^{n+2}}{B(n+2)} \right], \quad (5.4)$$

где $A = \frac{\pi^2 D_n^2 \sin \alpha \cos \alpha}{2} \left(1 - \frac{me}{t}\right) h$; ω – скорость вращения шнека (с^{-1}); $B = \frac{dp}{dl} + \frac{2\tau_{\text{BH}} + \tau_{\text{BT}} W \text{tg} \alpha}{W}$; τ_{BH} , τ_{BT} – соответственно удельные силы внешнего трения по поверхности винта и по поверхности рифленой втулки; dp/dl – так называемая «напорность шнека», характеризующая градиент давления по длине l канала шнека в зоне формования; W , h – соответственно ширина и высота винтового канала в формующей зоне шнека.

При увеличении сопротивления пресс-инструмента (давления p) длина зоны формования канала шнека возрастает, при уменьшении – сокращается. Связь этих двух величин (p , l) при условии постоянства напорности по длине канала шнека прямо пропорциональная.

Синхронность работы загрузочной и формующей зон в значительной мере сказывается на напорность пресса. Увеличение производительности загрузочной зоны больше производительности формующей зоны снижает напорность шнека и приводит к недопустимому росту длины запрессованной зоны. Выход зоны формования непосредственно к бункеру приводит к уменьшению степени заполнения межвиткового объема шнека. Создаются критические условия, когда незначительное увеличение давления на входе в пресс-инструмент не может быть преодолено прессом, который исчерпал свои возможности по дальнейшему увеличению длины формующей зоны. В топливной массе возникают касательные сдвиговые напряжения τ_c , превышающие ее прочность на срез $\tau_{\text{ср}}$. Когда $\tau_c \geq \tau_{\text{ср}}$, вместе с винтом начинает вращаться топливная масса, не продвигаясь по каналу шнека. Это явление носит название «срыв массы с рифов»; в топливе возникают интенсивные тепловые выделения, которые могут привести к его разогреву вплоть до температуры воспламенения.

Подобное явление может наблюдаться и при малой длине зоны формования и низких значениях противодействия в случае, когда топливная масса из бункера в нужном количестве не транспортируется шнеком в зону формования. Возникает так называемая «недопитка» топливом формующей зоны. В ре-

зультате материал не продвигается вдоль винтового канала, а вращается вместе со шнеком и за счет диссипации энергии нагревается, что приводит к возгоранию топлива.

Следовательно, загрузочная зона должна подавать столько топливного полуфабриката в зону формования шнека, сколько шнек может в данных конкретных условиях выдать в виде результирующего потока. Отклонение в ту или другую сторону ухудшает работу пресса, повышая опасность процесса и снижая качество изделий.

Как показывает практика, нормальная работа пресса обеспечивается в том случае, когда [5]

$$\left(\frac{Q}{Q_d}\right) \approx 0,85-0,82 \quad \text{и} \quad \left(\frac{Q_p + Q_\delta}{Q_d}\right) \leq \sim 0,2. \quad (5.5)$$

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику физико-химическим процессам аутогезии и когезии в термопластичных полимерных системах на примере производства баллиститного топлива.

2. Назовите основные физико-механические процессы переработки баллиститных топлив по технологии проходного прессования.

3. Как влияет работа зоны транспортировки гранул (таблеток) топлива на качественные показатели формирующей зоны шнекового пресса?

4. Что такое «напорность шнека»? Какие параметры процесса переработки термопластичных материалов влияют на стабильную работу шнековых машин?

5. Для какой цели в шнековых машинах используют пресс-инструмент? Что такое раструбный пресс-инструмент и как его используют в шнековой технологии?

6. Какие геометрические параметры, реологические характеристики и технологические параметры необходимо учитывать в расчетных уравнениях для определения производительности шнековых машин?

Глава 6. ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОХОДНОГО ШНЕКОВАНИЯ [5–8]

6.1. Потребляемая мощность в процессе проходного шнекования

В процессе шнекования большая часть подводимой механической энергии превращается в тепло. Часть тепла отводится поверхностями втулки и шнека, другая часть рассеивается в перерабатываемом материале. С учетом относительно низкой теплопроводности баллиститного топлива по сравнению с металлической стенкой оболочки и шнека, это вызывает неравномерный нагрев перерабатываемого материала в объеме винтового канала. Температура в канале винта значительно изменяется от поверхности винта к поверхности втулки [5]. В некоторых случаях неравномерное распределение тепла может приводить к значительным локальным перегревам топлива, что необходимо учитывать в процессе шнекования.

Кроме того, при конструировании шнековых прессов и их эксплуатации возникает необходимость точных прочностных расчетов отдельных несущих деталей, узлов и приводов, а также выбора электродвигателя, выполнение которых зависит от правильного расчета потребляемой мощности.

Наибольший расход мощности в процессе проходного шнекования приходится на зону формования, где возникают высокие давления в перерабатываемом материале. Величину потребляемой мощности можно рассчитать по формуле

$$N = N_{\text{пол}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{ут}}, \quad (6.1)$$

где $N_{\text{пол}}$ – полезная мощность, расходуемая на обеспечение шнеком результирующего объемного расхода Q [рассчитывается по уравнению (5.4)] и максимального давления p_{max} для продавливания через формующие каналы пресс-инструмента; $N_{\text{тр}}$ – суммарная мощность, расходуемая на преодоление сил трения; $N_{\text{ут}}$ – затраты мощности на утечки в зазоре между ребордой винта и поверхностью втулки.

Полезная мощность

$$N_{\text{пол}} = p_{\text{max}} Q. \quad (6.2)$$

Мощность, расходуемая на преодоление сил трения,

$$N_{\text{тр}} = N_1 + N_2 + N_3, \quad (6.3)$$

где N_1 – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала по поверхности втулки; N_2 – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на поверхности шнека; N_3 – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на торце шнека.

Выражения для расчета составляющих мощности $N_{\text{тр}}$

$$N_1 = \pi \tau_{\text{ВТ}} l W D_{\text{H}} \omega; \\ N_2 = \pi \tau_{\text{ВН}} (2h + W) l D_{\text{ср}} \omega; N_3 = 0,26 \psi \tau_{\text{ВН}} D_{\text{В}}^3 \omega; \quad (6.4)$$

Здесь ψ – коэффициент формы торца, равный отношению фактической площади поверхности к площади круга диаметром $D_{\text{В}}$; остальные обозначения как в формулах (5.3) и (5.4).

Мощность, расходуемая на утечки в зазоре шнека

$$N_4 = \frac{Q_{\text{утел}}}{\pi D_{\text{H}} \delta}. \quad (6.5)$$

Удельный расход энергии q определяется отношением величины технологической расходуемой мощности N к производительности пресса G

$$q = \frac{N}{G} = \frac{N}{Q\rho} = q_{\text{пол}} k_{\text{тех}}, \quad (6.6)$$

где $q_{\text{пол}} = N_{\text{пол}} / (Q\rho)$ – *полезный удельный расход энергии*, расходуемой на процесс формования топливной массы с плотностью ρ и выдавливанием через формующий пресс-инструмент с объемным расходом Q в процессе проходного шнекования; $k_{\text{тех}} = 1/\eta$ – *коэффициент технологической эффективности* при компактировании сыпучих материалов давлением; $\eta = N_{\text{пол}} / N$ – энергетический коэффициент полезного действия.

В используемых прессах проходного шнекования штатных составов баллиститных топлив $\eta \approx 0,30$ – $0,40$ и $q_{\text{пол}} \sim 1,5$ – $2,0$ кВт на 100 кг/ч перерабатываемого топлива.

6.2. Безопасность процесса проходного шнекования

Создание баллиститных ракетных топлив с улучшенными энергетическими характеристиками за счет введения в состав

металлических горючих порошков и мощных ВВ отразилось на их свойствах:

- повышенная чувствительность к детонационному импульсу и механическим воздействиям;
- ухудшение реологических вязкостных свойств;
- понижение термомеханических свойств.

В результате возросло число возгораний топлива при изготовлении заготовок для ракетных зарядов с использованием шнековых прессов [6]. Проведенные под руководством И.Я. Петровского исследования взрывных характеристик баллистических порохов и топлив показали, что превышение некоторой «критической скорости нарастания давления $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{кр}$ » газообразных продуктов их горения в замкнутом объеме (манометрической бомбе) может перейти во взрыв.

Наиболее опасным участком по длине шнека является переходная или зона уплотнения, в которой порох или топливо находятся в рыхлом состоянии. В этой зоне шнека плотность топлива меняется от насыпной до плотности монолитного состояния, т.е. возникает градиент плотности по длине винтового канала.

Вероятность перехода горения в детонацию в рабочем объеме пресса уменьшается при увеличении «напорности шнека» $\left(\frac{dp}{dl}\right)$, что приводит к сокращению размеров зоны уплотнения и увеличению градиента роста плотности топлива по длине винтового канала.

Градиент плотности определяет возможность разгона детонации от низкоскоростного значения в рыхлом топливе до высокоскоростного в плотном топливе. Поэтому с его ростом увеличивается величина критической скорости нарастания давления $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{кр}$. В существующих шнековых прессах максимальное допустимое значение $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{кр}$ для различных составов топлив составляет 7,0–13,0 МПа/(мс) [5].

Для разрыва детонационной цепи в конструкции шнековых прессов предусмотрена динамическая втулка (рис. 6.1), имеющая ступенчато убывающую толщину перемычек в направлении от торца винта к бункеру пресса за счет профрезированных пазов вдоль образующих по всему периметру. Прочность стенки втулки существенно ослаблена в зоне переходных плотностей топлива и выдерживает давление до 50–60 МПа; ее разрушение приводит к мгновенному сбросу нарастающего давления и разрыву детонационной цепи [5].

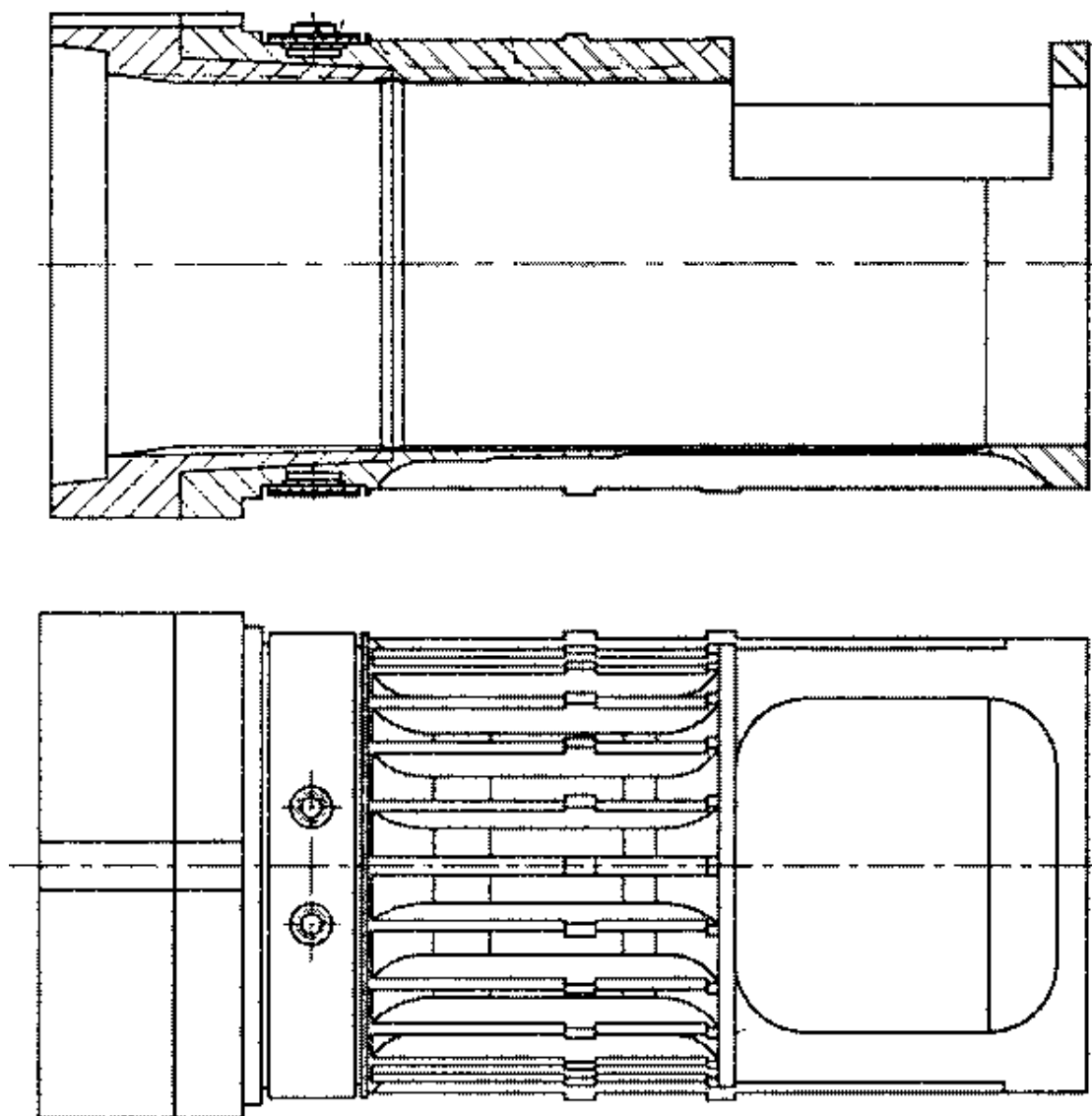


Рис. 6.1. Общий вид динамической втулки пресса ПСВ [5]

Нежелательное снижение величины $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{кр}$ также связано с повышенным содержанием в пороховом и топливном полуфабрикate мелких частиц, недостаточной уплотненностью и гомогенностью таблеток (гранул) после технологических операций вальцевания и сушки. С целью повышения безопасности работы шнековых прессов было предложено дополнительно уплотнять и укрупнять таблетки, поступающие на формование шашек (заготовок) для ракетных зарядов, для чего используют *пресс кольцевой таблетирующий* (ПКТ).

6.3. Пресс кольцевой таблетирующий (ПКТ)

Сушка баллиститного твердого топлива до средней остаточной влажности 0,2 % мас. в сушильных агрегатах часто приводит к пересушиванию поверхностных слоев таблеток, что существенно повышает чувствительность полуфабриката к вспышке и детонации.

Кроме того, при движении в рабочих органах сушильных агрегатов и транспортных системах в полуфабрикate повышается содержание мелочи, топливной пыли. За счет частичной поверхностной деструкции таблеток нарушается их гомогенность, что также приводит к возникновению вспышки и детонационного перехода. Поэтому для повышения взрывобезопасности топливного полуфабриката было предложено уплотнять и укрупнять его перед подачей в формующий пресс. Одним из аппаратов, предназначенных для решения этой задачи, является *пресс кольцевой таблетирующий* (ПКТ) (рис. 6.2, а).

Пресс включает в себя станину 1, в которой на приводных валах 2 закреплены вращающиеся перфорированный барабан 3 и рифленый ролик 4. В корпусе пресса установлены загрузочный бункер 5, срезной нож 6 и приемный лоток 7. Ролик и барабан обогреваются горячей водой до температуры 75–90 °С.

Топливный полуфабрикат при температуре 75–85 °С из загрузочного бункера 5 поступает во внутреннюю полость вращающегося барабана 3, по всей цилиндрической поверхности которого расположены радиальные калибрующие отверстия 8 диаметром 10 мм (рис. 6.2, б).

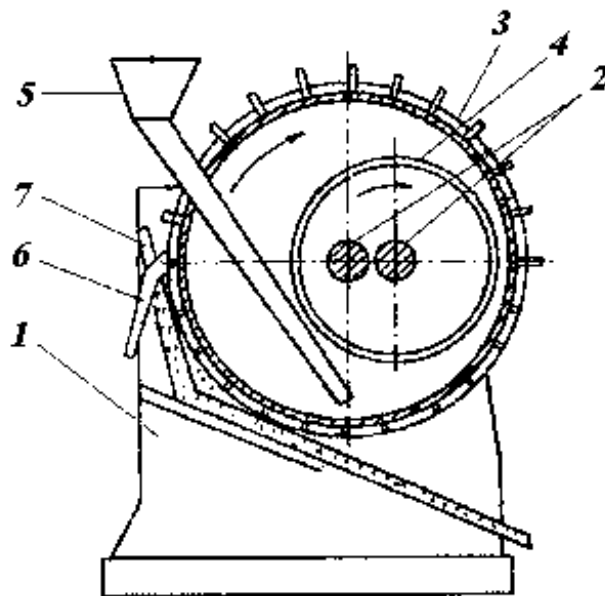


Рис. 6.2, а. Принципиальная схема пресса кольцевого таблетующего (ПКТ) [8]:

*1 – станина; 2 – валы; 3 – барабан; 4 – ролик; 5 – загрузочный бункер;
6 – нож; 7 – лоток*

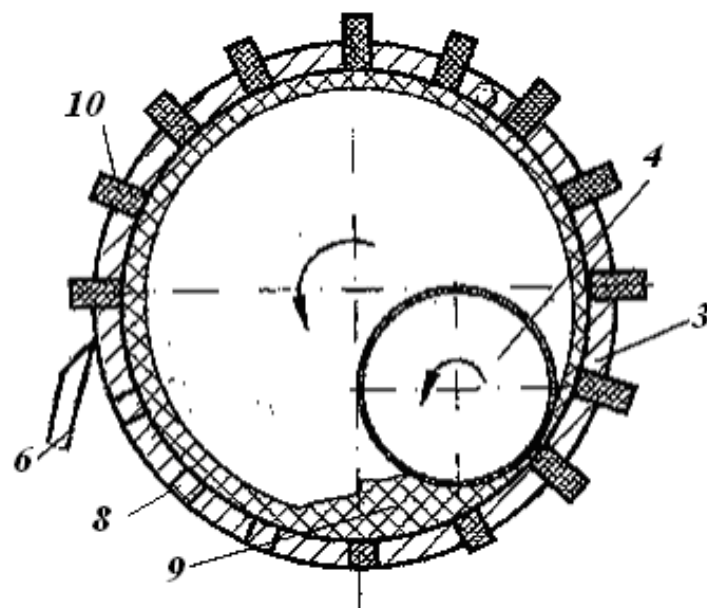


Рис.6.2, б. Формующее устройство ПТК [8]:

8 – отверстия; 9 – топливная масса; 10 – шнуры

При одновременном вращении ролика 4 и барабана 5 топливная масса захватывается рифленным роликом 4; в результате на внутренней поверхности барабана образуется топливный «чулок» 9, который уплотняется в зазоре между роликом и ба-

раба́ном и продавлива́ется через отверстия 8 в виде топливных шнуров 10. Образующиеся топливные шнуры срезаются ножом 6 в виде плотных таблеток. Последние ссыпаются по лотку 7 в бункер транспортера, подающего их на фазу формирования шашки-заготовки для ракетного заряда.

Гранулирование осуществляется путем циклического продавливания топливной массы, находящейся в вязкотекучем состоянии через калибрующие отверстия барабана. Наибольшее давление в топливной массе возникает в момент ее нахождения в минимальном зазоре между барабаном и роликом. Это давление равняется

$$p = \tau_{\text{тр}} \frac{2l}{R}, \quad (6.7)$$

где $\tau_{\text{тр}}$ – удельное внешнее трение; R, l – соответственно радиус и длина формирующего цилиндрического канала.

6.4. Резка и охлаждение изделий

Резку выходящей из шнек-пресса шашки на заготовки для ракетных зарядов требуемой длины осуществляют с помощью специальных резательных агрегатов-станков. Они представляют собой ножи гильотинного типа, которые приводятся в движение пневматическим приводным механизмом, что обеспечивает большую безопасность этой технологической операции. Резательные агрегаты работают в условиях, когда температура топлива шашки выше температуры стеклования и при этом сохраняются его пластические свойства. Непрерывно выходящая из формирующего пресс-инструмента шнекового пресса шашка по специальному лотку проходит под лезвием ножа и достигает концевого выключателя, установленного на заданную длину изготавливаемого изделия. При подаче сигнала от концевого выключателя пневматический механизм подачи опускает нож, который отрезает шашку. После операции резки заготовка в зависимости от габаритов поступает на специальный приемный лоток (для мелких шашек) или ленточный транспортер (для крупных шашек), которые вывозят шашку из кабины.

Нож представляет собой стальное полотно, закрепленное в подвижной сборке, которая соединена со штоком пневматического цилиндра и движется вдоль вертикальных стоек.

Разработано несколько вариантов резательных станков с различными типоразмерами, предназначенных для резки шашек из БТРГ малого (60–100 мм), среднего (100–400 мм) и большого (400–800 мм) диаметров.

Одним из основных требований к оборудованию для резки шашек является обеспечение безопасных режимов резания и отсутствие косого среза на торцах изделия. Операцию резки движущейся по лотку шашки необходимо проводить с ограниченной скоростью; это требование трудно выполнить особенно для шашек большого диаметра. Если резательный станок не обеспечивает нужного среза, то в производство необходимо вводить дополнительную, крайне нежелательную, механическую операцию – торцовку шашек на токарном или фрезерном станках.

В качестве примера на рис. 6.3 изображена принципиальная схема автомата АТР-Ш для резки шашек к ракетному комплексу «Град».

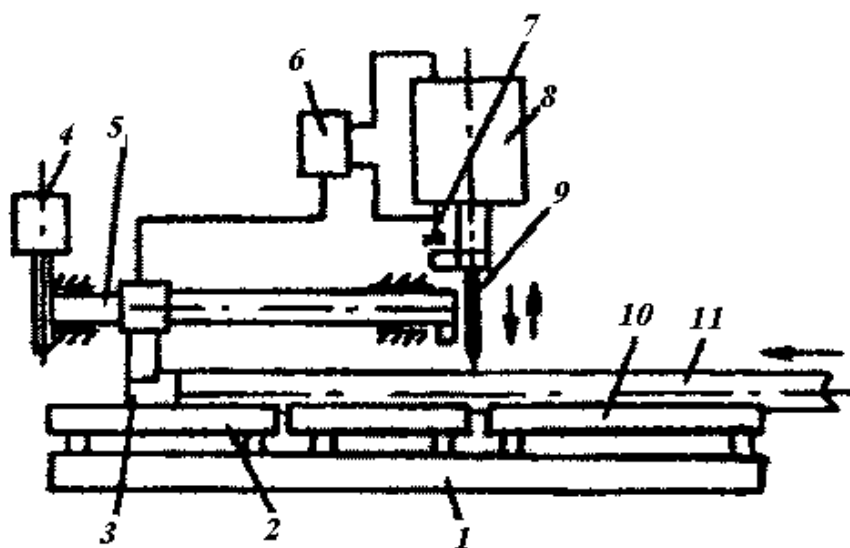


Рис. 6.3. *Принципиальная схема автомата АТР-Ш для резки шашек к изделию «Град» [6]:*

- 1 – станина; 2 – направляющие; 3 – концевой датчик;
4 – механизм отладки; 5 – регулировочный вал;
6 – распределитель воздуха; 7 – винт; 8 – пневматический привод;
9 – нож; 10 – опрокидыватель; 11 – топливная шашка*

На станине автомата 1 закреплены направляющие 2, по которым движется шашка 11 к ножу 9. Когда торец шашки коснется рычага пневмонаконечника 3, с его помощью переключат-

ется воздухораспределитель 6. Воздух под давлением поступает в пневмоцилиндр 8 и перемещает поршень вниз, на штоке которого закреплен нож 9; последний отрезает шашку. В конце рабочего хода ножа 9 винт 7 поворачивает вал, пневмонаконечник 3 убирается и не мешает движению шашки. Воздухораспределитель 6 меняет подачу воздуха в штоковую полость пневмоцилиндра, в результате нож возвращается в исходное положение. Открывается створка опрокидывателя 10 и отрезанная шашка удаляется с автомата. Автомат настраивают на требуемую длину шашки с помощью концевого выключателя 3, который установлен на регулировочном валу 5. Настройка автомата может быть также проведена дистанционно с помощью специального механизма 4.

Автомат АТР-Ш предназначен для резки шашек диаметром 80–120 мм и длиной 890–900 мм; точность резки по длине составляет $\pm 0,5$ мм при скорости движения шашки 120 мм/с.

Охлаждение шашек после их выхода из пресс-инструмента и резки на заготовки для ракетных зарядов требует длительного времени, особенно для изделий большого диаметра. Охлаждение наиболее часто проводят методом свободной конвекции или водой. Основным фактором, влияющим на процесс охлаждения, является коэффициент теплоотдачи. Он колеблется в широких пределах: от 5–10 Дж/(м²·с·К) при свободной конвекции до 500–700 Дж/(м²·с·К) при охлаждении шашек проточной водой.

При охлаждении свободной конвекцией шашки располагают на стеллажах в специальном помещении; процесс продолжается в зависимости от диаметра шашек от 12 до 90 часов.

Если охлаждать шашки водой, то время процесса сокращается во много раз. Например, для зарядов к изделию «Град», время охлаждения снижается с 24 до 3 часов. Шашки последовательно перемещают из ванн с высокой температурой воды в ванну с более низкой температурой. Температура в первой ванне 50–55 °С, во второй – 35 °С и в третьей – 20–25 °С.

После охлаждения шашки подсушивают потоком сухого воздуха и направляют на фазу окончательных операций изготовления ракетных зарядов.

6.5. Технологические схемы непрерывной переработки БТРТ

На рис. 6.4 и 6.5 показаны технологические схемы непрерывной переработки баллиститных твердых топлив.

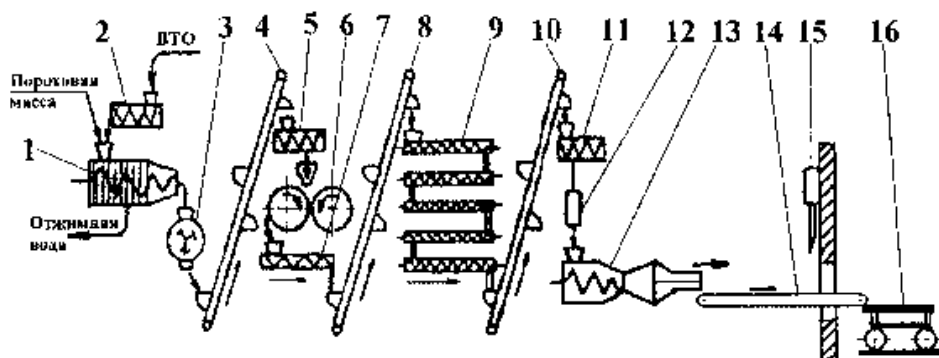


Рис. 6.4. Технологическая схема ПО-НВ-С-ШС-34 непрерывной переработки топливной массы [7]:

- 1 – отжимной пресс ПО-125; 2 – дозатор ВТО; 3 – протирачный аппарат;
 4, 8, 10 – ковшевые элеваторы; 5, 11 – шнековые дозаторы; 6 – вальцы;
 7 – шнековый транспортер; 9 – шнековая сушилка; 12 – металлоотсекатель;
 13 – формующий шнек-пресс ШС-34; 14 – ленточный транспортер;
 15 – пневматический нож; 16 – тележка для приема и транспортирования готового изделия

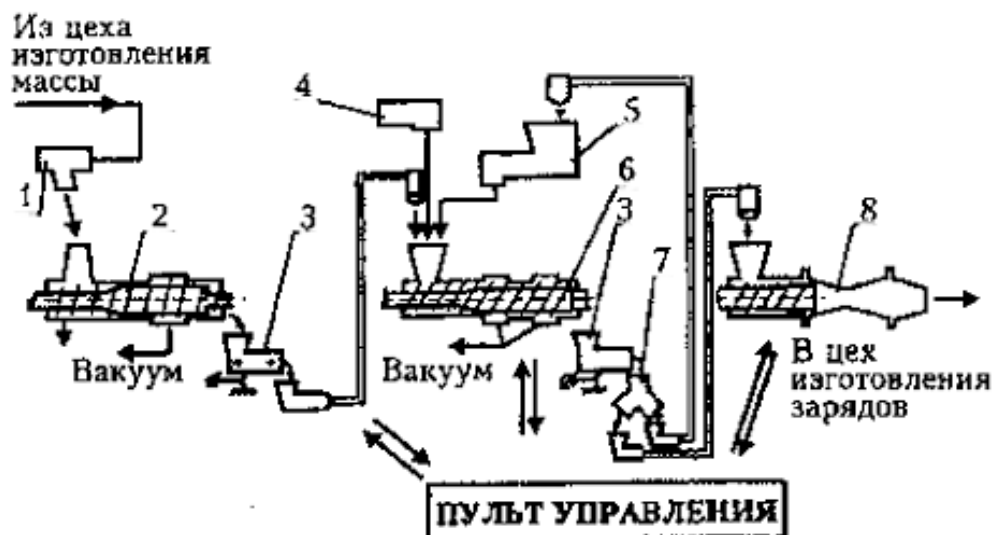


Рис. 6.5. Технологическая схема ПО-СПА-ПВВ автоматизированной непрерывной переработки топливной массы [7]:

- 1 – синхронизатор; 2 – отжимной пресс пластифицирующий ПО-300;
 3 – устройство контроля производительности; 4 – устройство ввода добавки;
 5 – устройство хранения и ввода ВТО; 6 – шнек-пресс пластифицирующий СПА;
 7 – устройство автоматической загрузки формующего пресса;
 8 – формующий пресс ПВВ-300 с пресс-инструментом

Полуфабрикат с фазы на фазу производства передается ковшевыми элеваторами (см. рис. 6.4) или пневмотранспортом (см. рис. 6.5), что позволяет исключить передачу возникшего загорания с одной технологической фазы на другую. Возвратные технологические отходы (ВТО) могут вводиться на стадиях отжима воды и вальцевания (см. рис. 6.4) или в шнек-пресс пластифицирующий (см. рис. 6.5).

Технологическая схема ПО-СПА-ПВВ (см. рис. 6.5) более компактна, универсальна, менее трудоемка по сравнению со схемой ПО-НВ-С-ШС-34 (см. рис. 6.4) [5].

В качестве формующего пресса по технологической схеме (см. рис. 6.5) предлагается использовать пресс ПВВ–300 (рис. 6.6). Характеристики пресса в сравнении с серийными прессами ШС-34 и ПСВ –2М приведены в табл. 6.1

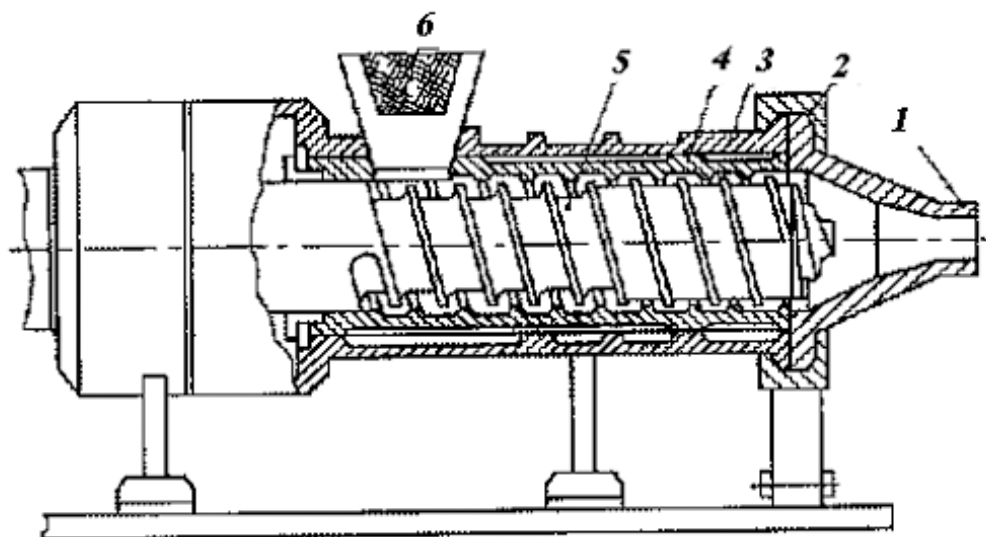


Рис. 6.6. Общий вид шнек-пресса ПВВ-300[5]:

1 – пресс-инструмент; 2 – хомут; 3 – корпус передний; 4 – втулка винтовая; 5 – шнек; 6 – бункер

Таблица 6.1

Сравнительная характеристика прессов [5]

Наименование характеристик	Тип пресса			
	ШС-34	ПСВ	ПСВ-2М	ПВВ-300
Производительность, кг/ч	450	650	800	1000
Диаметр винта (максимальный), мм	250	250	250	234

Наименование характеристик	Тип пресса			
	ШС-34	ПСВ	ПСВ-2М	ПВВ-300
Мощность привода, кВт	20	25	25	30
Масса, т	3,7	2,9	3,0	5,7
Максимально допустимое значение dp/dt , МПа/(мс)	7,0	8,0	11,0	13,0

Пресс ПВВ в отличие от других конструкций имеет на втулке винтовую нарезку; в зоне загрузки она выполнена шестизаходной, а в прессующей – трехзаходной. Трехзаходный винт имеет переходную зону, как и в прессе ПСВ-2, спрофилированную по спирали Архимеда, что обеспечивает высокий градиент плотности материала. Пресс ПВВ имеет «напорность шнека» в 2 раза, а срок эксплуатации в 4–5 раз больше, чем у ПСВ-2.

Контрольные вопросы

1. Какие физико-механические явления определяют затрачиваемую мощность процесса проходного прессования баллиститных ракетных топлив?
2. Что такое коэффициент технологической эффективности шнековых прессов? Назовите способы его повышения.
3. Какие главные факторы влияют на величину критической скорости нарастания давления $(dp/dt)_{кр}$ баллиститных ракетных топлив? Почему желательно повышать значение этого параметра в процессе шнекования баллиститного пороха и ракетного топлива?
4. Общая характеристика и назначение пресса кольцевого таблетирующего (ПКТ) в технологическом процессе переработки баллиститных ракетных топлив.
5. Какими технологическими средствами осуществляется операция разделения топливной шашки на отдельные блоки? Их краткая характеристика и принцип действия.
6. В каких случаях используют механическую обработку при изготовлении ракетных зарядов?

Глава 7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БАЛЛИСТИЧНЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ [5–9]

7.1. Окончательные операции изготовления изделий из БТРТ

К окончательным операциям изготовления ракетных зарядов относят:

- дефектоскопию;
- механическую обработку;
- бронирование;
- приемку ракетных зарядов.

7.1.1. Дефектоскопия изделий

Основными технологическими операциями при дефектоскопии шашек-заготовок из БТРТ являются: визуальный осмотр внешнего вида изделия; теневая ультразвуковая дефектоскопия; радиационный контроль (гамма-спектроскопия, радиографический метод); рентгеновская дефектоскопия.

Интроскопический неразрушающий контроль для обнаружения дефектов в виде посторонних включений, трещин, разнотекстурности и других в изделиях БТРТ, как правило, осуществляют методом *теневого ультразвуковой дефектоскопии*. Метод основан на особенностях распространения ультразвуковых упругих колебаний (УЗК) с частотами 18–22 кГц в твердых средах и на границе раздела сред.

Принципиальная схема ультразвукового теневого метода контроля показана на рис. 7.1. Генератор 1 подает электрические колебания на пьезоэлемент излучающего преобразователя 2, который генерирует ультразвуковые колебания. Последние проходят через изделие 6 и попадают на пьезоэлемент приемного преобразователя 3, откуда электрические колебания поступают в приемник 4. Здесь поступающие электрические сигналы усиливаются и преобразуются в ток регистрирующего устройства 5. 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.

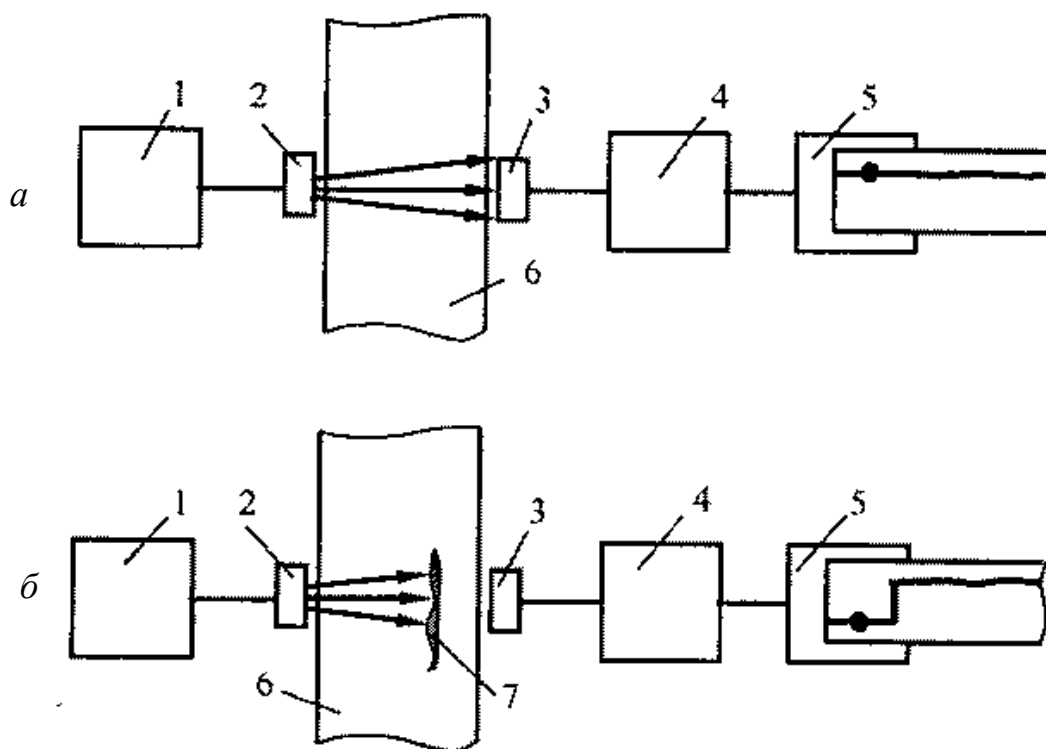
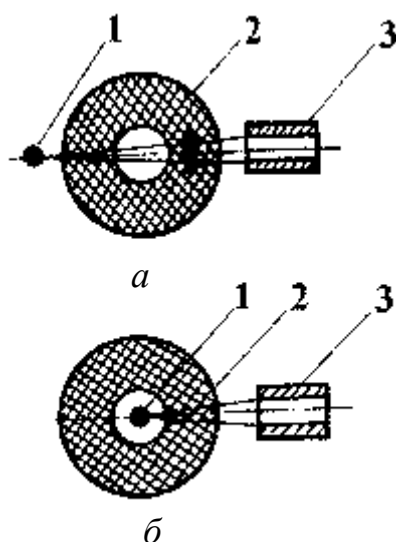


Рис. 7.1. Принципиальная схема ультразвукового теневого метода контроля бездефектного изделия (а) и изделия с дефектом (б) [5]: 1 – генератор ультразвуковой аппаратуры; 2 – излучающий преобразователь; 3 – приемный преобразователь; 4 – приемник ультразвуковой аппаратуры; 5 – регистрирующее устройство; 6 – изделие; 7 – дефект

Принятая методика предусматривает диаметральный и радиальный способы контроля.

При *гамма-спектропии* изделие просвечивается на гамма-дефектоскопах по схемам (рис. 7.2). В качестве источника излучения 1 используется изотоп Co_{60} , а в приемнике 3 размещают сцинтилляционный кристалл NaJ . Метод основан на проникающей способности жесткого гамма-излучения, которое, пройдя изделие 2, попадает на кристалл NaJ и вызывает в нем световые вспышки (сцинтилляции). Свечение преобразуется фотоэлектронным умножителем детектора в электрический ток, который усиливается электронной аппаратурой. Если изделие имеет раковину, то в нем поглощается меньшее количество гамма-квантов; следовательно, большее их количество попадет на кристалл NaJ , что регистрируется на дефектограмме.



*Рис. 7.2. Диаметральная (а) и радиальная (б) гаммаскопия заряда [7]:
1 – источник излучения; 2 – заряд; 3 – приемник излучения (детектор)*

Применение диаметральной или радиальной схемы просвечивания определяется габаритами изделия и наличием или отсутствием канала. Контролирующее устройство может оставаться неподвижным в случае, когда изделие вращается и поступательно перемещается. Если изделие только вращается, то контролирующее устройство перемещается вдоль образующей изделия.

По такому же принципу осуществляют *рентгеновскую дефектоскопию*; в этом случае источником облучения является жесткое рентгеновское излучение. На рис. 7.3 показан общий вид установки для рентгеновской дефектоскопии вкладного ракетного заряда.

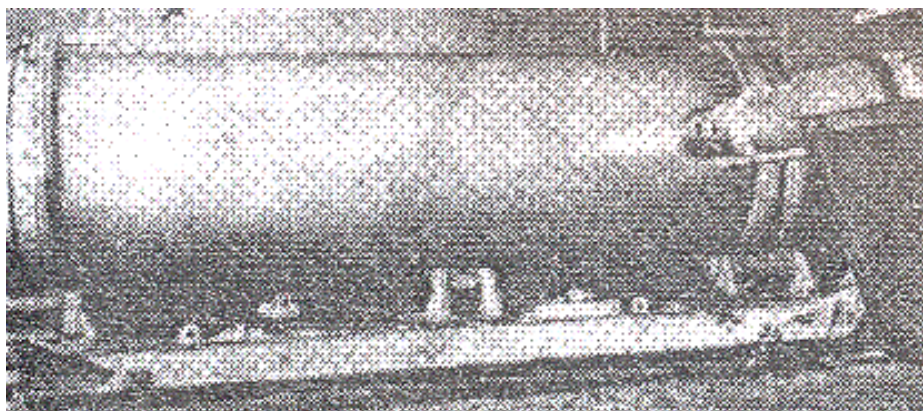


Рис. 7.3. Рентгеновская дефектоскопия изделия [7]

7.1.2. Механическая обработка изделий

Необходимость механической обработки шашек-заготовок в ряде случаев связана с тем, что вкладные ракетные заряды для различных систем вооружения имеют достаточно сложную форму с различными конусами, уступами, выточками и т.п. и по этой причине не могут быть получены только методом проходного прессования и требуют дополнительную механическую обработку.

В связи с этим механическая обработка шашек-заготовок в производстве зарядов из БТРТ занимает важное место. Положение усугубляется не только необходимостью широкой номенклатуры специального механообрабатывающего оборудования и инструмента, но и довольно высокой пожароопасностью данной операции, требующей специальных мер защиты.

Режимы резания (скорость, подача, глубина), определяющие степень механического воздействия на обрабатываемый материал, должны обеспечить безопасное выполнение операции и исключить возможность загорания.

Топливные шашки обрабатывают на токарных, фрезерных, сверлильных станках при комнатной температуре, с проливом водой или обдувом воздухом режущей кромки резца и всей зоны резания. При обработке заготовок на станках, как правило, осуществляется полив водой сверху в зону резания и под режущую кромку через резец. Расход воды составляет 90–300 л/ч с учетом ширины стружки.

В зависимости от типа БТРТ и его чувствительности к механическим воздействиям разработана их классификация по группам степени опасности механической обработки и допустимых режимов ее осуществления по видам проводимых механических операций [5,6]. В табл. 7.1 приведены данные о режимах резания при различных видах механической обработки. Верхние пределы относятся к топливам со скоростью горения порядка 8–9 мм/с, нижние – к топливам с более высокой скоростью горения [6].

Таблица 7.1

Режимы резания шашек из БТРТ [6]

Характеристика резания	Виды операций		
	Токарная	Фрезерная	Сверлильная
Скорость резания, м/с	100/35	80/35	40/10
Глубина резания, мм/об	1,2/0,2	0,6/0,1 мм/зуб	0,6/0,1
Подача, мм	30/10	-	до 16

После механической обработки поверхность шашки очищают от пыли, затем ее обезжиривают спиртом или ацетоном и подвергают грунтовке. Последняя операция заключается в нанесении на поверхность, подлежащую бронированию, тонкого слоя специального состава для увеличения адгезии бронепокрывтия с топливной массой.

7.1.3. Бронирование изделий

Вкладные заряды БТРТ, не скрепляемые с корпусом ракетного двигателя, во многих случаях подвергают покрытию части поверхности инертным термостойким бронирующим составом, которое в сочетании с формой заряда обеспечивает требуемый закон газообразования при работе РДТТ.

К бронепокрывтиям предъявляют следующие основные требования:

- хорошая адгезия к заряду для надежной работы РД в заданном интервале температур его эксплуатации;
- в сочетании с формой заряда обеспечить заданный закон газообразования;
- небольшая плотность, чтобы не увеличивать пассивную массу ракеты; обеспечивать надежную работу РД при минимальной толщине покрытия;
- необходимые теплофизические и физико-механические характеристики, чтобы предохранять бронируемую поверхность РЗ от воспламенения за весь период работы РДТТ;
- близкие к топливу значения коэффициентов теплового расширения;

- материалы для бронирования должны иметь широкую отечественную сырьевую базу и низкую стоимость.

Такое многообразие требований делает практически невозможным создание универсального бронепокрытия и способов его нанесения для всех видов ракетных зарядов.

Из применяющихся промышленных методов бронирования ракетных зарядов наибольшее распространение получили следующие:

- намотка различными крепящими материалами;
- заливка;
- экструзия.

Принципиальная схема бронирования зарядов методом намотки показана на рис.7.4.

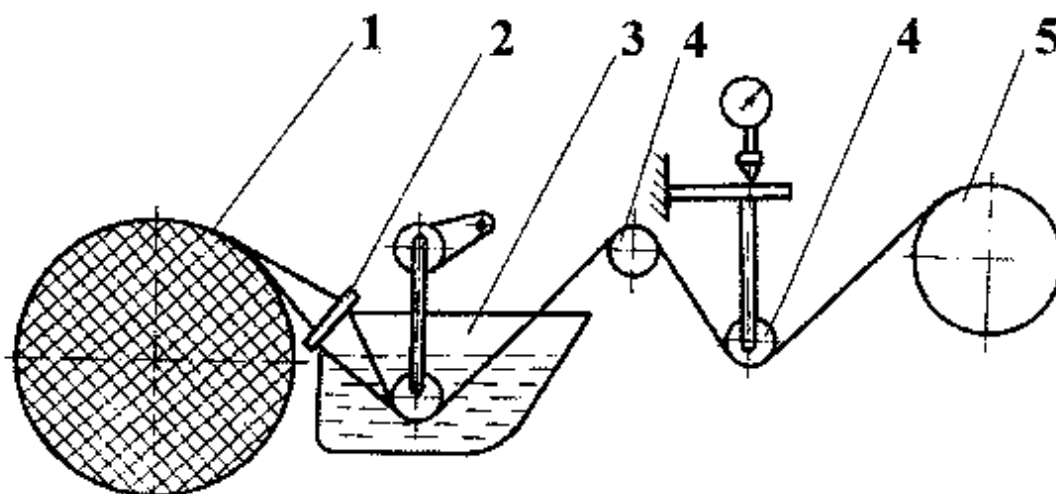


Рис. 7.4. Принципиальная схема бронирования зарядов методом намотки [7]:

*1 – заряд; 2 – фильера; 3 – ванна с бронесоставом;
4 – натяжные ролики; 5 – барабан*

Ленту или жгут нитей сматывают с барабана 5, пропускают через ванну с жидким бронесоставом 3, пропитывают им и затем наматывают на заряд 1. С помощью фильеры 2 устанавливается определенная степень отжима ленты или жгута нитей, а натяжение обеспечивают натяжные ролики 4. После достижения заданной толщины покрытия изделие продолжает вра-

щаться на станке 2–3 ч для равномерного распределения состава и его отверждения (полимеризации).

В процессе отверждения бронепокрытия заряд термостатируют при определенной температуре. После охлаждения заряда проверяют качество бронепокрытия и в случае необходимости проводят его механическую (токарную) обработку в соответствии с технической документацией на изделие. Для увеличения огнестойкости бронепокрытия и предохранения от воздействия влаги поверх него наносят термостойкую эмаль. Готовые изделия маркируют, предъявляют заказчику и укупоривают.

Принципиальная схема бронирования методом заливки показана на рис. 7.5.

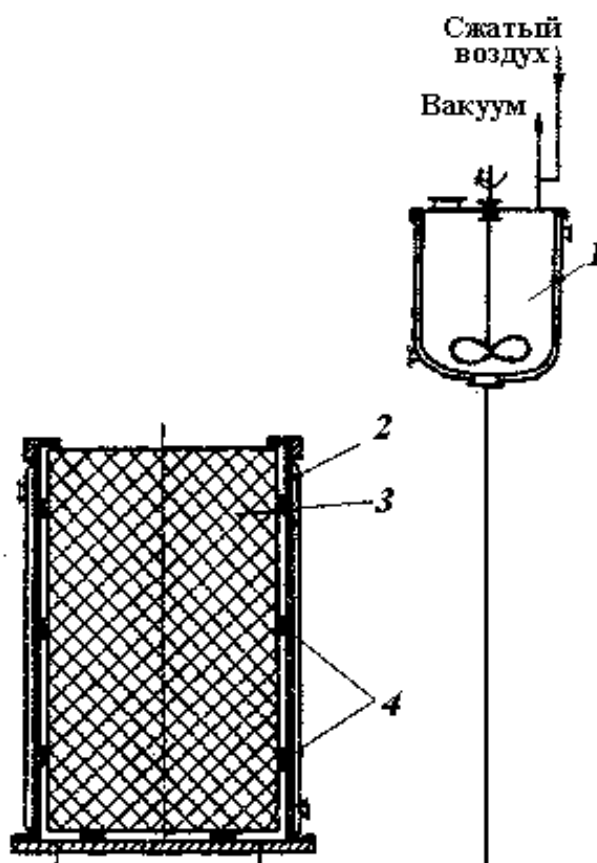


Рис. 7.5. Принципиальная схема бронирования методом заливки [7]:

1 – смеситель; 2 – изложница; 3 – заряд; 4 – «сухари»

На подлежащий бронированию заряд 3 в нескольких местах наклеивают так называемые «сухари» 4 из предварительно отвержденного бронесостава, которые обеспечивают центровку

заряда в изложнице 2. Внутренняя поверхность изложницы покрыта антиадгезионной пленкой; корпус изложницы имеет рубашку для обогрева или охлаждения. Готовят бронесостав в смесителе 1, куда подают все необходимые компоненты; смешение компонентов осуществляют под вакуумом. По окончании смешения бронемасса сжатым воздухом или с помощью насоса по гибким трубопроводам подается в зазор между зарядом и внутренней поверхностью изложницы; толщина получаемого бронепокрывтия определяется величиной этого зазора. После этого бронепокрывтие отверждается в процессе его полимеризации, для чего в рубашку изложницы подают горячую воду при определенной температуре.

Если необходимо забронировать канал заряда, то в него вставляют специальный стержень, покрытый антиадгезионной пленкой; бронемассу заливают в зазор между стержнем и поверхностью канала.

По окончании процесса отверждения и охлаждения заряд извлекают из изложницы, контролируют качество бронепокрывтия, в случае необходимости проводят механическую обработку, наносят термостойкую эмаль, маркируют и предъявляют заказчику.

Этот метод позволяет бронировать изделия сложной формы, а также, в случае необходимости, торцы заряда.

Короткий технологический цикл нанесения бронепокрывтия позволяет использовать составы с небольшим временем действия и сократить операции их отверждения. Условия труда на этой технологической фазе производства ракетных зарядов более благоприятны, чем при бронировании методом намотки.

Недостатком бронирования методом заливки является необходимость изготовления специальных изложниц для каждого типа зарядов и возможные осложнения их центровки в изложнице (особенно крупногабаритных) и последующего извлечения из нее. Поэтому метод имеет ограничения по габаритам зарядов – не более 800 мм по диаметру и 1000 мм по длине [5].

Метод экструзии используют при бронировании цилиндрической поверхности зарядов диаметром до 250 мм [6]. Он отличается относительной простотой и высокой производи-

тельностью. Для нанесения бронеслоя на поверхность заряда используют шнековые прессы с угловым пресс-инструментом (экструдеры с угловой головкой) (рис. 7.6). Термопластичный бронесостав, нагретый до вязкотекучего состояния, продавливается шнеком 1 в пресс-инструмент 2 и далее в кольцевой зазор, который образован зарядом 5 и формующей фильерой 4. Заряды отделены друг от друга инертными пробками 3. Бронесостав обволакивает поверхность заряда и вместе с ним выходит из формующего канала пресс-инструмента. Затем заряды отделяют друг от друга, отрезая инертную прокладку. Для адгезии бронепокрытия на поверхность заряда наносится специальный лаковый подслои.

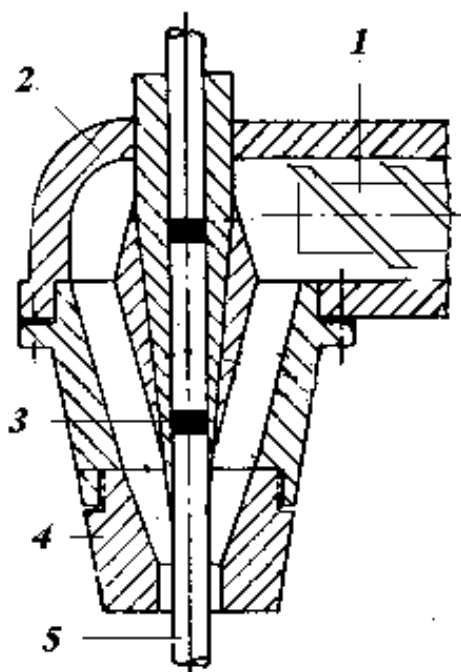


Рис. 7.6. Принципиальная схема бронирования методом экструзии:

*1 – шнек; 2 – угловой пресс-инструмент; 3 – инертная прокладка;
4 – фильера; 5 – заряд*

В результате действия гидростатического давления за счет нагнетания шнеком бронемассы в пресс-инструмент и увлекающего действия движущегося изделия бронемасса течет через кольцевое зазор $H = R_1 - R_0$ формующей фильеры и образует на выходе из пресс-инструмента покрытие толщиной h .

Если диаметр заряда R_0 , скорость его движения V и задана толщина покрытия h , то требуемое значение объемного расхода бронемассы Q определяется по уравнению

$$Q = \pi V[(R_0 + h)^2 - R_0^2] = \pi Vh(2R_0 + h). \quad (7.1)$$

Необходимый перепад давления в пресс-инструменте для объемного расхода бронемассы Q в кольцевом зазоре формирующей фильеры с внутренним радиусом R_1 рассчитывают по уравнению

$$\Delta p = \frac{6\mu_{эф}LV(2h + R_0 - R_1)}{(R_1 - R_0)^3}. \quad (7.2)$$

Реологические свойства бронирующих материалов при экструзионной переработке соответствуют неньютоновским псевдопластичным жидкостям со степенным законом течения. Тогда

$$\mu_{эф} = \kappa \left(\frac{V}{R_1 - R_0} \right)^{n-1}. \quad (7.3)$$

Уравнения (7.1) – (7.3) позволяют рассчитывать требуемый объемный расход бронематериала и возникающее давление в пресс-инструменте в зависимости от реологических характеристик бронемассы, скорости движения заряда и геометрических размеров формирующей фильеры.

Существуют и другие методы бронирования зарядов: приклейка готового бронематериала, главным образом, к торцам изделий; использование готовых бронечехлов и другие.

7.2. Области применения изделий из БТРТ

В последние десятилетия были созданы новые высокоэффективные модифицированные баллиститные твердые топлива, которые нашли широкое применение в различных средствах вооружения, плазменных высоконаполненных топливах, топливах для оптико-квантовых генераторов и фотодиссоционных лазеров, а также в гражданской продукции (градобойные системы, аэрозольные противопожарные средства, промышленные ВВ) [5].

В качестве примера рассмотрим следующие области применения БТРТ в средствах вооружения.

Реактивная система залпового огня (РСЗО) «Град-1» [9]

РСЗО «Град» (рис. 7.7, а).

Техническая характеристика

Боекомплект, шт	120 неуправляемых реактивных снарядов (НУРС)
Число трубчатых направляющих, шт	36
Время залпа, с	18
Температурный диапазон боевого применения, °С	– 50 - +50
Расчет, чел	3
Приведенная площадь поражения общим залпом, га:	
живой силы	2,06
техники	3,6

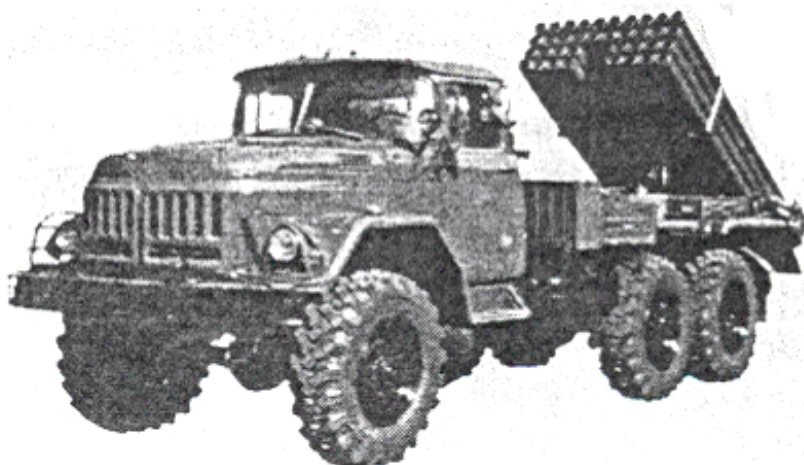


Рис 7.7, а. Ракетная система залпового огня «Град-1»

НУРС 9М28Ф к системе «Град-1» (рис. 7.7, б).

Техническая характеристика

Калибр, мм	122
Длина, мм	2270
Масса, кг	56,5
Масса головной части, кг	21
Дальность полета снаряда, км	до 15



*Рис. 7.7, б. Неуправляемый реактивный снаряд 9М28Ф (б) [9]:
 1 – взрыватель; 2 – головная часть; 3 – ракетный двигатель;
 4 – ведущий штифт; 5 – блок стабилизатора*

Реактивная система залпового огня (РСЗО) «Ураган» [9]

РСЗО «Ураган» (рис. 7.8, а).

Техническая характеристика

Число трубчатых направляющих, шт	16
Время заряжения, мин	20
Время залпа в автоматическом режиме:	
с постоянным темпом, с	8,6
с переменным темпом, с	20
Расчет, чел	4

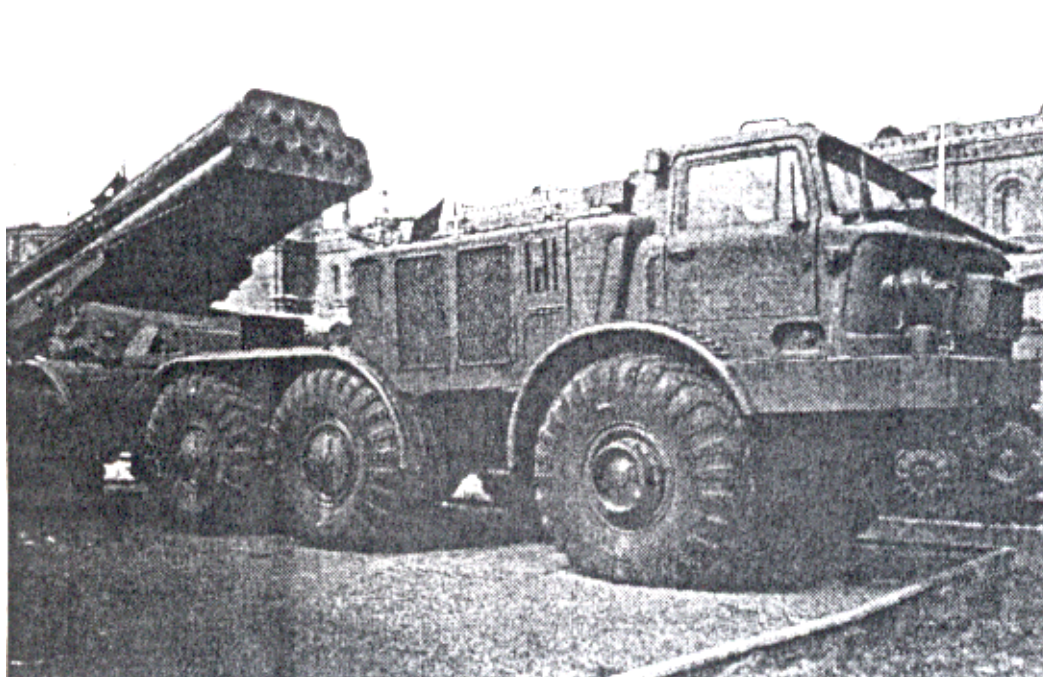


Рис. 7.8, а. Ракетная система «Ураган»

НУРС 9М27К к системе «Ураган» (рис. 7.8, б).

Техническая характеристика

Калибр, мм	220
Длина, мм	5178
Масса, кг	270
Масса головной части, кг	90
Дальность полета снаряда, км	до 35

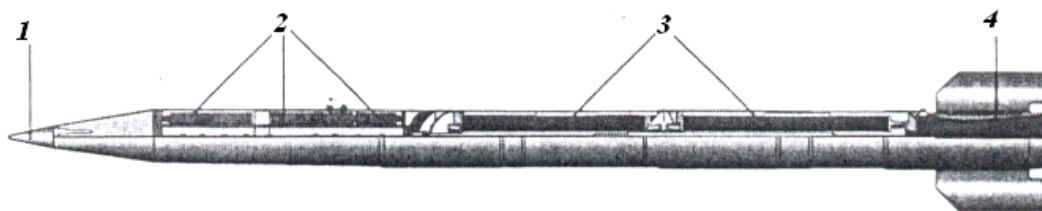


Рис. 7.8, б. *Неуправляемый ракетный снаряд 9М27К (б) [9]:*

1 – взрыватель; 2 – боевые осколочные элементы;
3 – ракетная часть с зарядом из двух частей; 4 – блок стабилизатора

Реактивная система залпового огня (РСЗО) «Смерч» [9]

РСЗО «Смерч» показан на рис.7.9, а.

Техническая характеристика

Число трубчатых направляющих, шт	12
Время залпа, с	не более 40
Время заряжания, мин	20
Запас хода, км	650
Расчет, чел	3

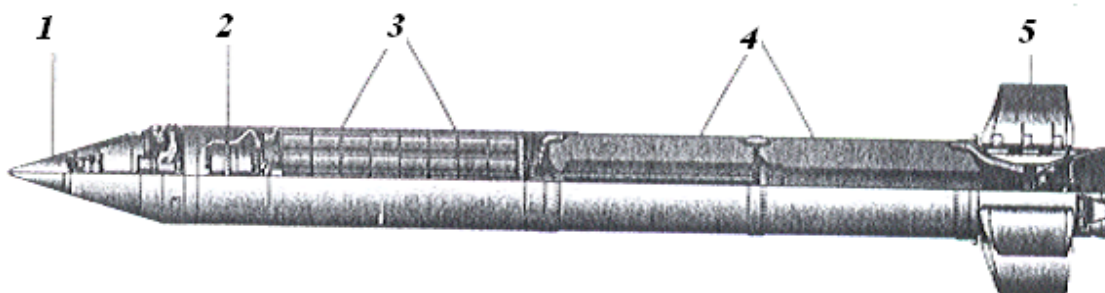


Рис. 7.9, а. *Ракетная система «Смерч»*

Корректируемый реактивный снаряд 9М55К3 к системе «Смерч» (рис. 7.9, б).

Техническая характеристика

Калибр, мм	300
Длина, мм	7600
Масса, кг	800
Масса головной части, кг	273
Дальность полета, км	до 70



*Рис. 7.9, б. Корректируемый реактивный снаряд 9М55К3 (б) [9]:
1 – электронно-временное устройство; 2 – блок системы управления;
3 – противопехотные мины; 4 – ракетная часть с зарядом из двух частей; 5 – блок стабилизатора*

Контрольные вопросы

1. Назовите основные способы дефектоскопии шашек-заготовок из БТРТ и дайте им краткую характеристику.
2. Какие проблемы возникают на технологической операции резки шашек-заготовок из БТРТ?
3. Назовите причины проведения механической обработки шашек-заготовок из БТРТ?
4. Какие окончательные технологические операции осуществляют после получения шашек-заготовок из БТРТ?
5. Дайте характеристику технологической операции бронирования ракетных зарядов; для каких целей ее проводят при производстве твердых ракетных зарядов?

Глава 8. СМЕСЕВЫЕ ТВЕРДЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА [1–4, 10, 11]

В СССР первый пуск твердотопливной ракеты с дальностью полета 2500 км и стартовой массой 64 тонны с использованием вкладных зарядов из БТРТ диаметром 800 мм был осуществлен в 1962 году. Дальнейшее развитие военных ракет на основе баллистического топлива затруднялось из-за недостаточного уровня их энергомассовых характеристик и технологических ограничений по максимальному размеру заряда, который не превышал 1000 мм.

В США уже в 1963 году на вооружении находились твердотопливные ракеты из СТРТ стратегического назначения «Минитмен» с дальностью полета 10000 км и «Полярис» с дальностью полета 2500 км, базирующиеся на атомных подводных лодках. В 1965 году США осуществили запуск сверхкрупной ракеты «Титан», которая имела два твердотопливных двигателя диаметром 3 метра и массой заряда около 200 тонн каждый.

В настоящее время в США широко применяются ракеты на основе СТРТ для космических полетов. С этой целью была создана ракета-носитель «Сатурн-5», работающая на жидком водороде и кислороде, а в качестве первой ступени связка твердотопливных двигателей СТРТ [2,7,10].

В СССР, начиная с 60-х годов прошлого столетия, начались интенсивные работы по созданию СТРТ для ракет стратегического и оперативно-тактического назначения. Первая отечественная ракета на основе СТРТ стратегического назначения РТ-2 дальностью полета 9500 км со стартовой массой 51 тонна была принята на вооружение в 1965 году. За короткий срок фактически была создана принципиально новая отрасль ракетной топливной промышленности – производство СТРТ и ракетных систем на его основе [7,10].

8.1. Состав и основные энергомассовые характеристики СТРТ

Стремительное развитие СТРТ как в нашей стране, так и за рубежом (прежде всего в США) обусловлено более высокими энергомассовыми и другими характеристиками по сравнению с БТРТ.

Смесевые твердые ракетные топлива представляют собой гетерогенные высоконаполненные полимерные композиции, дисперсионной средой которых является жидковязкое горючее связующее, а дисперсной фазой порошкообразные окислители, металлические и органические горючие, а также специальные добавки (пластификаторы, отвердители, катализаторы и ингибиторы процесса горения, поверхностно-активные вещества и другие) [3,7].

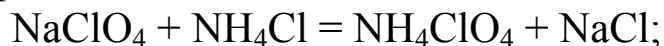
Окислители являются основными источниками кислорода в топливе. Основные требования к окислителю следующие:

- высокая энтальпия образования и плотность;
- высокое содержание окислительных элементов. Их оценивают по процентному содержанию общего и свободного кислорода в молекуле окислителя;
- возможно большее удельное газообразование;
- низкая чувствительность к механическим и другим импульсам.

Среди твердых окислителей (перхлоратов, хлоратов, нитратов, оксидов металлов и др.) наиболее полно удовлетворяет перечисленным требованиям перхлорат аммония NH_4ClO_4 (ПХА). Это бесцветное кристаллическое вещество, плотность монокристалла $\rho = 1950 \text{ кг/м}^3$; температура разложения $T_{\text{раз}} \approx 270^\circ\text{C}$. ПХА содержит 34% активного кислорода, хорошо растворим в воде, склонен к электризации и слеживаемости [7]. Для уменьшения слеживаемости частиц ПХА и обеспечения нужной сыпучести в его массу вводят в качестве добавок (модификаторов) высокодисперсные порошки кремния диоксида, кальция фосфата и других веществ.

В химической промышленности ПХА получают двумя основными способами:

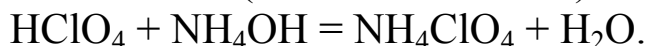
- методом обменного разложения натрия перхлората и аммония хлорида



- методом нейтрализации хлорной кислоты газообразным аммиаком, когда хлорную кислоту нейтрализуют газообразным аммиаком



или гидроксидом аммония (аммиачной водой)



Содержание влаги в промышленном ПХА составляет 10–15 %, мас., его частицы имеют неправильную форму. Такая форма частиц неблагоприятна для реологических свойств топливной массы, уменьшая ее текучие свойства. По этой причине для производства смесового ракетного топлива частицам ПХА придают сферическую форму (рис. 8.1). Для этого водную насыщенную суспензию с частицами ПХА многократно прогоняют через циркуляционный контур центробежного насоса.

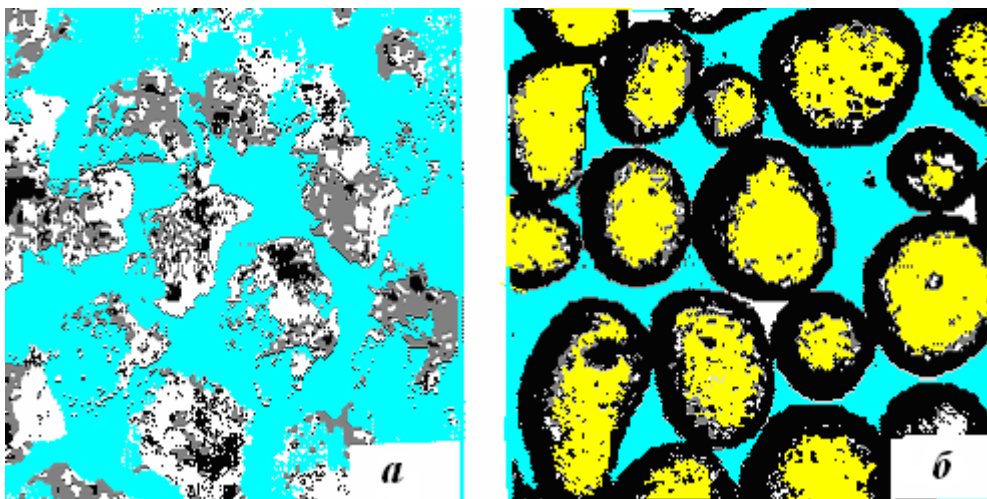


Рис. 8.1. Вид кристаллов ПХА обыкновенных (а) и округлой формы (б) [7]

Новым эффективным окислителем в составах СТРТ является аммониевая соль динитрамида (АДНА) – $\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2$. Это бесцветное кристаллическое вещество, $\rho = 1840 \text{ кг/м}^3$, $T_{\text{пл}} = 92$ –

94 °С, $T_{\text{раз}} \approx 130\text{--}135$ °С. Благодаря более высокой энтальпии образования и удельной газовой постоянной продуктов сгорания по сравнению с ПХА топлива с АДНОЙ имеют на ~5% больший удельный импульс и бесхлорные продукты сгорания.

Горючие вещества являются основными источниками теплоты и газов, которые выделяются при их взаимодействии с окислителями. В качестве горючих веществ наиболее часто используют:

- высокодисперсные порошки алюминия типа АСД;
- циклические нитроамины, прежде всего октоген (CH_2NNO_2)₄;
- гидрид алюминия (AlH_3), который является не только источником теплоты, но и легкого газа – водорода.

На эффективность применения металлического горючего в составе СТРТ в первую очередь влияют содержание активного (неокисленного) металла, форма частиц и их размер. Промышленные порошки алюминия марки АСД (алюминий сферический дисперсный) содержат не менее 99 % активного Al; в зависимости от марки АСД среднемассовый диаметр частиц находится в пределах 5–15 мкм. В последнее время стали использовать также ультрадисперсный алюминий (УДА) и нанодисперсный (НДА) с размерами частиц ~ 1 мкм и 0,1 мкм соответственно. Применение УДА и НДА позволяет снизить агломерацию частиц алюминия на поверхности горения топлива и соответственно энергетические потери и повысить скорость горения в 1,5–3 раза, а также уменьшить зависимость скорости горения от давления.

Топлива, в которых ПХА частично заменен на такое мощное ВВ, как октоген, характеризуются более высоким удельным импульсом и более низкой температурой продуктов сгорания. Максимальное содержание октогена в топливе может достигать ~ 50 %, мас.

В смесевых ракетных топливах замена металла на гидрид металла приводит к увеличению удельного импульса и уменьшению температуры продуктов сгорания, что является благо-

приятным фактором для твердотопливных ракетных двигателей. По комплексу свойств гидрид алюминия AlH_3 в наибольшей степени соответствует требованиям как компонент СТРТ.

Горючие связующие вещества (ГСВ) – это низкомолекулярные олигомеры или высокомолекулярные полимерные композиции. К ним предъявляют следующие требования:

- создавать вязкотекучую однородную систему при взаимодействии с пластификаторами;
- хорошо смачивать все порошкообразные компоненты и смешиваться с ними с образованием однородной дисперсной системы;
- обладать заданными реологическими характеристиками;
- придавать топливным массам необходимые технологические свойства и безопасно перерабатываться в изделия при температуре 70–75 °С;
- обладать физической и химической стабильностью в топливной массе.

В качестве ГСВ наиболее часто используют высокомолекулярные каучуки и каучукоподобные полимеры – бутилкаучук, бутадиеновые, уретановые, нитрильные и другие каучуки. В качестве пластификаторов применяют дибутилфталат, дибутилсебагинат, трансформаторное масло и другие.

Большое внимание уделяют так называемым активным ГСВ, в которых полимерная основа или пластификатор содержат окислительные элементы. К ним относят, например, нитрополиуретановые каучуки и пластификаторы, содержащие нитро-, нитратные, нитроаминные и другие группы (например, нитроглицерин).

Специальные добавки в СТРТ выполняют практически те же функции, что и в баллистиных ракетных топливах.

Отверждающими добавками могут быть различные соединения: эпоксидные смолы, диизоцианаты, тиурам, каптакс, сера, оксид цинка и другие.

Для регулирования скорости горения в пределах от 2 до 150 мм/с используют катализаторы: (например оксиды металлов) и ингибиторы горения (например фторид лития).

Для улучшения реологических свойств в состав СТРТ вводят различные поверхностно-активные вещества (ПАВ), компоненты в ультра - и нанодисперсном состоянии.

Многообразие составов СТРТ диктуется особенностями и эксплуатационными характеристиками и назначением различных ракетных комплексов. Принципиальные усредненные составы СТРТ с разными классами энергетических уровней приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Принципиальный состав и основные характеристики СТРТ [3]

Компоненты и характеристики	Содержание компонентов в составах, %			
	без энергетических добавок	с энергетическими добавками	высокоплотные	высокоимпульсные
Перхлорат аммония	75 – 85	45 – 50	10 – 30	5 – 10
АДНА	-	-	-	40 – 50
Октоген	-	15 – 25	30 – 50	-
ГСВ инертное	18 – 20	9 – 10	-	-
ГСВ активное	-	-	15 – 20	10 – 30
Алюминий	-	20 – 22	20 – 22	3 – 5
Гидрид алюминия	-	-	-	10 – 25
$I_{уд}$ ($p_k = 4,0$ МПа), (Н·с)/кг	2000 – 2200	2500 – 2550	2550 – 2600	2650 – 2750
ρ , кг/м ³	1550 – 1650	1880 – 1850	1850 – 1900	1600 – 1650
T_k , К	2500 – 3000	3000 – 3500	3600 – 3800	3500 – 3600
$W_{уд}$, м ³ /кг	1000 – 1100	800 – 900	800 – 1000	900 – 1100
U ($p_k = 4,0$ МПа), мм/с	5 – 15	5 – 15	5 – 15	10 – 20
ν	0,2 – 0,4	0,25 – 0,35	0,4 – 0,6	0,3 – 0,6
ν	0,9 – 1,0	0,4 – 0	0,4 – 0,6	0,4 – 0,8
σ_p , МПа	70 – 100	30 – 50	30 – 40	30 – 40
ε , %				

Дальнейшее повышение удельного импульса и плотности топлива можно достигнуть, применяя высокоплотные и энер-

гонасыщенные компоненты, прежде всего, окислители и горючие вещества, увеличивая степень наполнения топлива путем совершенствования гранулометрического состава, размера и формы частиц наполнителя, а также улучшая реологические свойства топлива, обеспечивая его большую текучесть.

8.2. Основные технологические фазы получения СТРТ

Принципиальная схема основных технологических фаз производства смесового твердого ракетного топлива включает в себя [7,10]:

1. *Подготовку компонентов:*

- окислителя и негорючих порошкообразных компонентов;
- горючего-связующего полимера и горючих компонентов.

2. *Получение топливной массы:*

- смешение компонентов;
- ввод в смесь отвердителя.

3. *Формование ракетных зарядов:*

- метод свободного литья;
- метод литья под давлением;
- проходное прессование.

Для изготовления всех типов крупных ракетных зарядов из СТРТ в США применяют технологию свободного литья. Приготовленную топливную массу под вакуумом заливают непосредственно в корпус двигателя с последующим отверждением и получением ракетного заряда, который прочно скрепляется с корпусом двигателя, находящимся в специальной шахте. Для приготовления топливной массы используют, как правило, планетарные смесители периодического действия. Смесительное оборудование размещают в отдельных зданиях; после приготовления топливной массы ее транспортируют вместе со смесителем или в специальных контейнерах в здания, где размещены корпуса ракетных двигателей. Корпус ракеты порционно и однородно заполняют топливом; процесс отверждения зарядов осуществляют в этих же шахтах. На рис. 8.2 показано поперечное сечение заряда из СТРТ диаметром 4,27 м и длиной 19,2 м, полученное в США методом свободного литья [7].

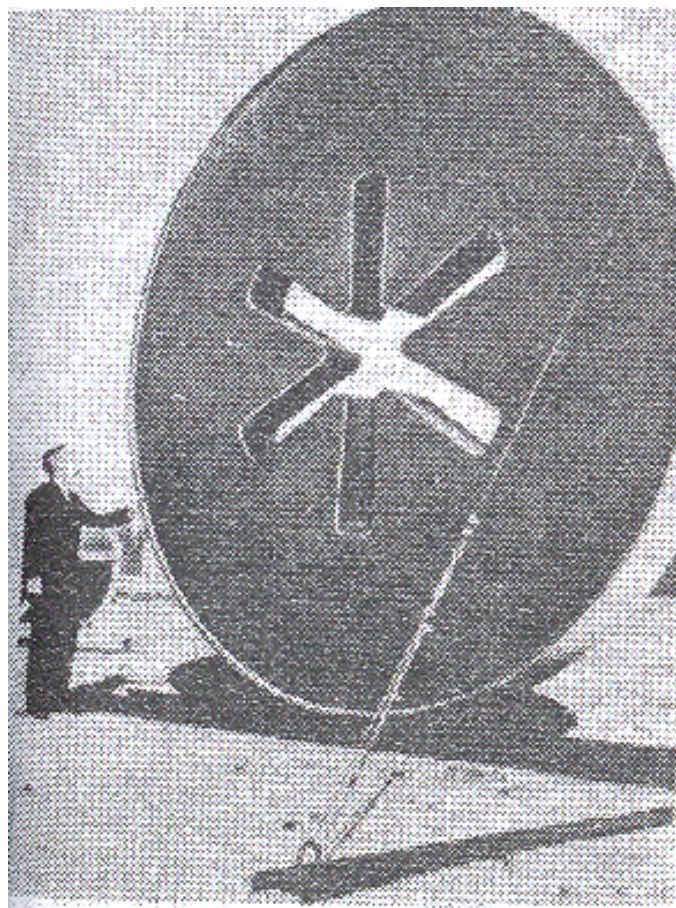


Рис. 8.2. Поперечное сечение заряда из СТРТ: диаметр 4,27 м; длина 19,2 м

Использование зарядов из СТРТ позволило корпус ракетных двигателей диаметром 3,0–6,6 м изготавливать из стеклопластиков со значительно меньшей пассивной массой по сравнению с корпусами из металлов; их производили методом намотки стекловолокна на специальную оправку и использованием соответствующего оборудования.

Эта технология стала основной в производстве смесового топлива и крупных ракетных зарядов СТРТ и в нашей стране [4,7,10].

Контрольные вопросы

1. Назовите основные компоненты СТРТ и их назначение в топливной массе.
2. Какие виды полимеров и пластификаторов используются в ГСВ?
3. Сформулируйте требования, предъявляемые к ГСВ?
4. Зачем в состав СТРТ вводят мощные ВВ, например октоген?
5. Какие изменения в составе СТРТ повышают их единственный импульс?
6. Назовите основные технологические фазы производства СТРТ.
7. Назовите методы формования ракетных зарядов из СТРТ. Какой из них является основным для изготовления крупногабаритных ракетных зарядов?

Глава 9. ПОДГОТОВКА КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА [8,10–12]

Технологическая фаза включает в себя:

- подготовку окислителя, негорючих порошкообразных компонентов и их смешение (приготовление рабочей смеси порошков – РСП);
- подготовку горючих связующих веществ (ГСВ), горючих порошкообразных компонентов и их смешение.

9.1. Подготовка окислителя (ПХА)

Повышенные требования к влажности и гранулометрическому составу ПХА обусловлены тем, что они оказывают существенное влияние на технологические свойства топливной массы, процессы ее отверждения, скорость горения и физико-механические характеристики готовых изделий.

На стадии подготовки ПХА проводят следующие технологические операции:

- измельчение окислителя;
- сушку;
- классификацию на фракции с разными диапазонами размера частиц;
- смешение отдельных фракций и получение готовой смеси порошков ПХА;
- смешение ПХА с негорючими порошками добавочных компонентов и получение рабочей смеси порошков (РСП).

Из дробильно-протирочного аппарата ПХА с влажностью ~ 5–10 % мас. системой транспортеров подается в сушильный агрегат. Наиболее часто используют сушилки с псевдоожиженным слоем.

Сушилки с псевдоожиженным слоем (рис. 9.1) представляют собой прямоугольную камеру 4 с находящейся над ней расширенной сепарационной зоной 3. Исходный твердый материал I из бункера 2 подается шнековым питателем 1 на псевдоожиженный слой. Сушильный агент IV (горячий воздух температурой 100–130 °С) поступает из коллектора 8 через распределительные камеры 7 и перфорированную решетку 10; его подачу регулируют по зонам с помощью поворотных заслонок 9.

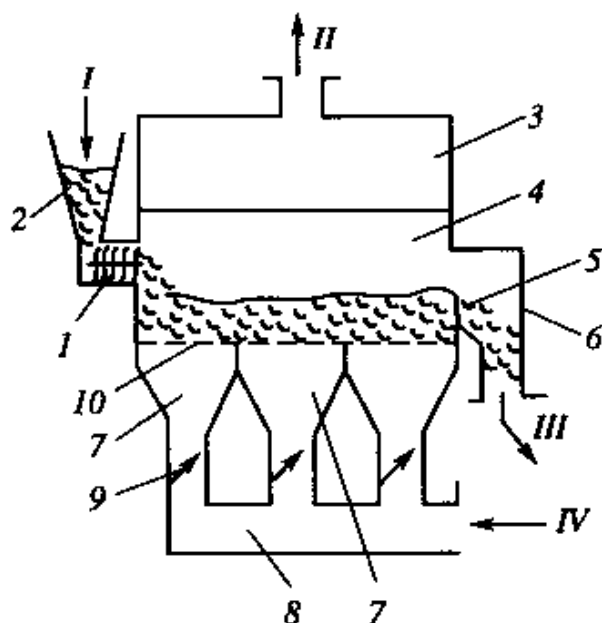


Рис. 9.1. Принципиальная схема сушилки с псевдооживленным слоем [11]:

I – исходный твердый материал; II – отработанный сушильный агент (горячий воздух); III – высушенный материал; IV – исходный сушильный агент; 1 – шнековый питатель; 2 – бункер; 3 – сепарационная зона; 4 – рабочая камера; 5 – пороги; 6 – короб; 7 – распределительные камеры; 8 – воздушный коллектор; 9 – поворотные заслонки; 10 – перфорированная решетка

Объемный расход воздуха рассчитывают и подбирают таким образом, чтобы слой ПХА находился в псевдооживленном состоянии без уноса отдельных частиц окислителя.

Из аппарата отработанный сушильный агент *II* отводится к пылеулавливающим устройствам. Материал в псевдооживленном состоянии перемещается к выходу зигзагообразно через противоположные зазоры, образованные вертикальными перегородками со стенками камеры; в некоторых конструкциях псевдооживленный материал «переливается» через пороги 5 и по коробу 6 отводится (*III*) в приемный бункер.

Сушка в псевдооживленном состоянии является одним из эффективных средств интенсификации этого процесса, так как каждая частица имеет контакт с сушильной средой. Влажность исходного продукта составляет 5–10 %, мас., а на выходе из сушилки не более 0,05 %, мас.

Для сушки ПХА используют и другие сушильные агрегаты: пневматические и вибрационные сушилки [11].

Высушенный ПХА поступает на операцию *классификации* – это процесс разделения сыпучего материала по крупности частиц. Для ПХА, как правило, используют механический вид классификации (грохочение). В процессе грохочения материал просеивается через набор плоских горизонтальных сит с отверстиями определенного размера. За счет вибрации и встряхивания сит сыпучий материал разделяется на рабочую фракцию с кондиционными размерами частиц, которые с помощью системы транспортеров поступают в накопительную емкость. Частицы большего и меньшего размера по сравнению с диапазоном рабочей фракции ПХА поступают в агрегат струйного измельчения (струйно-вентиляционную установку).

В струйной мельнице измельчение достигается за счет взаимного соударения частиц, разгоняемых до скоростей 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.

Типичная струйная мельница (рис. 9.2, *а*) для измельчения ПХА содержит помольную камеру 5, противоточные разгонные устройства 1, сепарационную камеру 3 и воздушный сепаратор 4. Поступающий в патрубок 6 исходный материал 1 подхватывается потоком газа и разделяется в сепараторе 4 (рис. 9.2, *б*) на мелкие и крупные частицы. Мелкие частицы выносятся из мельницы. Крупные частицы поступают по течкам 2 в эжекторы разгонных устройств 1, куда также под давлением подается энергоноситель – воздух или инертный газ II. В помольной камере струи, несущие материал, сталкиваются и за счет соударения частиц разрушаются. Далее смесь размолотого материала и газа выносятся в патрубок 6.

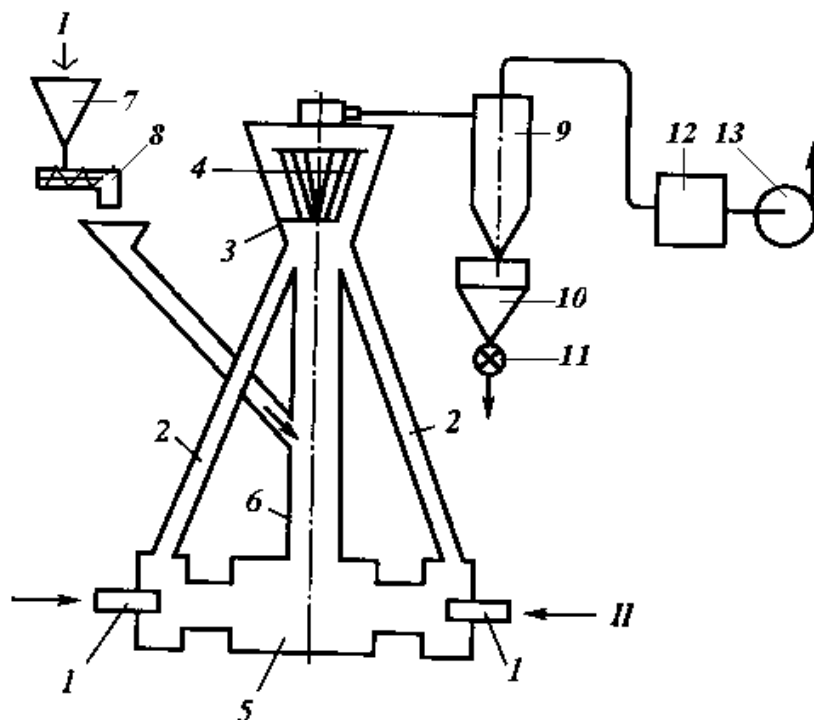


Рис. 9.2, а. Принципиальная схема струйной мельницы [11]:

I – исходный материал; *II* – воздух или инертный газ;

1 – разгонные устройства; *2* – точки для крупных частиц; *3* – сепарационная камера; *4* – сепаратор; *5* – помольная камера; *6* – центральная труба; *7* – бункер; *8* – шнековый питатель; *9* – циклон; *10* – приемный бункер мелкой фракции; *11* – шлюзовой затвор; *12* – фильтр; *13* – воздуходувка

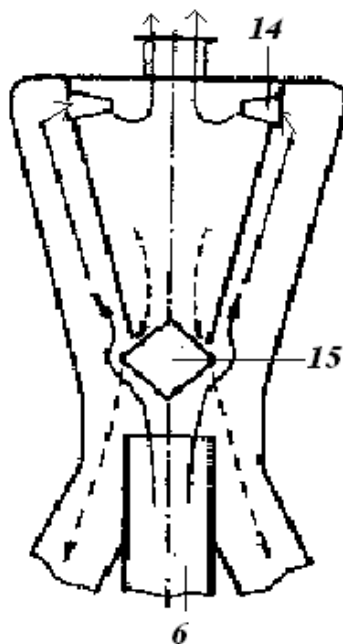


Рис. 9.2, б. Схема воздушного сепаратора [11]:

14 – лопатки окон внутренней камеры; *15* – отбойный конус

Поток воздуха с мелкими и средними частицами доходит до верхней крышки внешней камеры сепаратора (рис. 9.2, б) и через окна, снабженные поворотными лопатками, поступает во внутреннюю камеру сепаратора. Лопатки 14 придают вращательное движение аэросмеси, в которой развиваются центробежные силы. Под действием этих сил крупные частицы выпадают на внутреннем конусе внутренней камеры и через точки 2 попадают в размольную камеру для дополнительного измельчения. Воздух с мелкими частицами ПХА выходит из сепаратора через верхний патрубок и направляется в четыре циклона 9 (см. рис. 9.2, а). В них ПХА отделяется от воздуха и поступает в приемный бункер 10 и выгружается с помощью шлюзового затвора 11 и системой транспортеров в накопитель мелкой рабочей фракции.

Воздух из циклона 9 проходит фильтр 12 и воздуходувкой 13 возвращается в разгонные устройства 1. Таким образом, струйная мельница имеет замкнутый цикл по воздуху.

Степень дисперсности ПХА в процессе измельчения регулируют углом поворота лопаток 14 и определенной высотой отбойного конуса 15. Настройку установки на нужную производительность осуществляют за счет изменения скорости вращения шнекового питателя 8.

Серийно выпускаются струйные измельчители производительностью до 1000 кг/ч для непрерывного тонкого измельчения химических материалов. Размер частиц исходного материала не более 250 мкм, готового продукта от 2 до 3 мкм; давление сжатого воздуха 0,8 МПа.

Для измельчения ПХА используют агрегаты и других конструкций, например струйно-вихревые мельницы, помольно-вакуумные установки и другие [7].

9.2. Приготовление рабочей смеси порошков (РСП)

Установлено [11], что сферические частицы одинакового размера практически можно уложить с остаточной порозностью $\varepsilon = 0,42 - 0,38$ независимо от их диаметра. Отмечается, что плотность укладки существенно зависит от отношения

диаметра оболочки $d_{об}$ к диаметру частиц $d_ч$; при $d_{об}/d_ч > 10$ плотность укладки стремится к значению порозности $\varepsilon = 0,37$.

Плотность укладки можно значительно увеличить, если использовать бинарную смесь, состоящую из двух фракций одинакового размера крупных сфер диаметром $d_к$ и мелких сфер диаметром $d_м$. Установлено, что плотную укладку частиц в бинарной смеси можно получить, когда соблюдается условие фильтрации мелких сфер через каркас, образованный крупными сферами, т.е. $d_м \leq \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1\right) d_к = 0,154 d_к$ или $\frac{d_к}{d_м} \geq 7$.

Зависимости порозности слоя ε укладки сферических частиц двухкомпонентной смеси от массовой концентрации мелкой фракции в смеси $c_м$ при различных значениях отношения $d_к / d_м$ показаны на рис. 9.3. Порозность укладки ε возрастает при увеличении отношения $d_к / d_м$. Наиболее близкая к теоретически возможной ($\varepsilon = 0,14$) порозность укладки была получена при $\frac{d_к}{d_м} \cong 19$. Следует отметить, что с учетом максимальной массовой концентрации твердой фазы в слое, оптимальное массовое содержание мелкой фракции в смеси $c_м$ лежит в пределах 25–40 %; с увеличением отношения $d_к / d_м$ оптимальное содержание мелкой фракции приближается к нижнему пределу – 25 %.

Для получения методом вибрационной фильтрации трехкомпонентной фракционной упаковки используют соотношение диаметров сфер, равное 77:7:1, и соотношение объемов компонентов соответственно 67:23:10. Такая трехкомпонентная система имеет минимальную теоретическую порозность укладки, $\varepsilon = 0,065$. Экспериментально получена порозность $\varepsilon = 0,10$.

В работе [11] приведены данные вибрационной упаковки четырехкомпонентных фракционных смесей, из которых следует, что при вибрационном воздействии можно получить укладку с порозностью $\varepsilon = 0,049$ (теоретическая минимальная плотность укладки $\varepsilon = 0,029$).

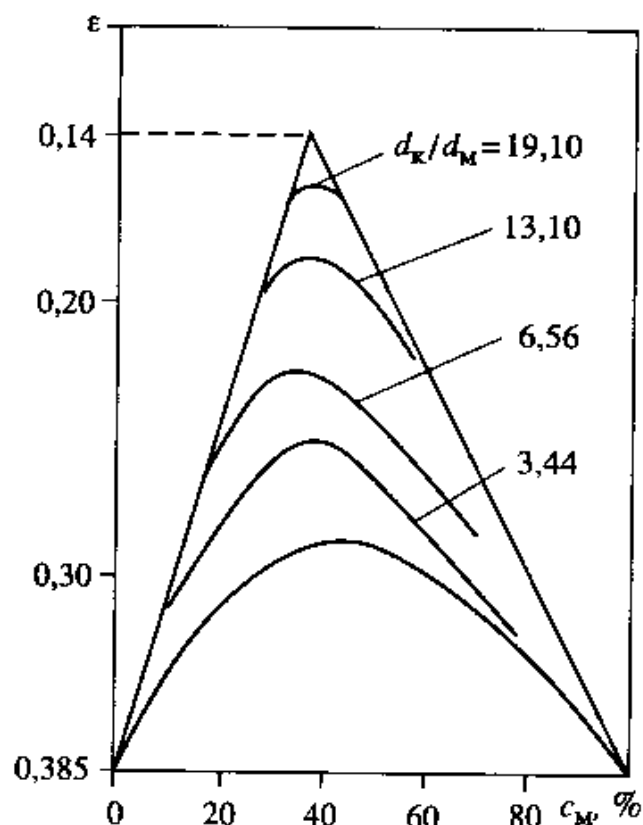


Рис. 9.3. Зависимость порозности слоя ϵ укладки сферических частиц двухкомпонентной смеси от массовой концентрации c_m мелкой фракции [11]

Однако получить высокие массовые концентрации твердой фазы в укладках порозностью $\epsilon < 0,14$ на практике достаточно сложно, так как размеры частиц каждой фракции должны отличаться друг от друга приблизительно на порядок; в четырехкомпонентной фракционной смеси наибольшая сферическая частица должна быть крупнее наименьшей на 4 – 5 порядков.

Кроме того, большинство используемых в промышленности порошков имеет частицы несферической формы и они не могут уплотняться по механизму вибропросеивания (виброфильтрации). При виброфильтрации мелкая фракция просеивается сквозь поры каркаса (скелета), образованного крупными частицами, и постепенно заполняет поровое пространство. Заполнение порового пространства скелета крупных частиц неправильной формы за счет просеивания мелкой фракции крайне затруднено, так как поры в этом случае имеют разные

размеры, сложную конфигурацию, а некоторые вообще могут быть закрытыми (тупиковые поровые каналы).

Поэтому в многофракционных системах из несферических частиц применяют метод предварительного смешивания исходных фракций.

Крупную и мелкую рабочие фракции ПХА в заданном весовом соотношении из накопительных емкостей загружают в передвижной контейнер-смеситель; в него также дозируют негорючие порошкообразные компоненты. Далее смешивают все указанные компоненты, как правило, в смесителях периодического действия барабанного типа. 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 весьма затруднено.

В смесителях барабанного типа отсутствуют перемешивающие устройства, и компоненты смешиваются за счет вращения корпуса. Основные типы барабанных смесителей показаны на рис. 9.4.

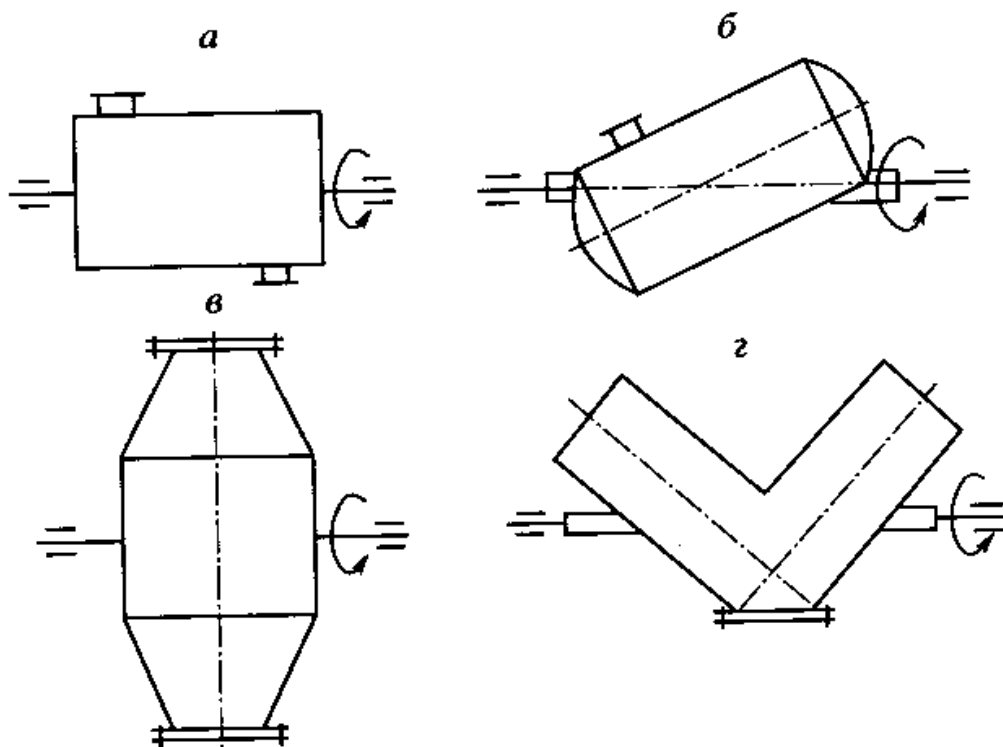


Рис. 9.4. Схемы барабанных смесителей без перемешивающих устройств [11]

Простейший смеситель (см. рис. 9.4, *а*) представляет собой цилиндрический барабан, расположенный горизонтально, с цапфами на концах. Ось вращения барабана расположена горизонтально или наклонно к образующей (см. рис. 9.4, *б, з*), в плоскости образующих барабана (см. рис. 9.4, *а*) или в плоскости, перпендикулярной к образующей барабана (см. рис. 9.4, *в*).

Смеситель *V*-образной формы (см. рис. 9.4, *з*), состоящий из двух цилиндров, установленных под углом 90° , обеспечивает качественное смешение материала за счет его периодического разделения на две части и интенсивного встряхивания при вращении барабана.

Барабанный смеситель с цапфами, расположенными по диагонали цилиндра (см. рис. 9.4, *б*), еще известный как «пьяная бочка», более качественно смешивает материал, чем упомянутые ранее смесители. На смесителях этого типа проводили основные исследования процесса смешения сыпучих материалов. Их наиболее часто используют при приготовлении РСП.

Барабанные смесители относятся к тихоходным машинам; линейная скорость вращения барабана обычно составляет $0,17 - 1$ м/с.

Транспортировка ПХА и других порошкообразных компонентов с одной фазы производства на другую или из одного аппарата в другой является ответственной технологической операцией. Для ее осуществления применяют различные средства [7]:

- напорный пневмотранспорт, в котором ПХА перемещается по трубам с помощью сжатого воздуха;
- вакуумный транспорт, в котором ПХА перемещается по трубам за счет разряжения, создаваемого вакуумным насосом в конце транспортной системы;
- шнековые транспортеры;
- спиральные транспортеры;
- ковшевые элеваторы;
- вибрационные транспортеры;
- подвижные контейнеры.

9.3. Приготовление горючих связующих веществ (ГСВ)

Назначение этой технологической фазы производства СТРТ заключается в смешении каучука с пластификатором, порошкообразным алюминием, отверждающими добавками и другими компонентами (за исключением мощных ВВ: гексогена и октогена); при этом осуществляется вакуумирование смеси для удаления воздуха и летучих веществ.

На фазе подготовки ГСВ средней вязкости обычно используют планетарные цилиндрические смесители периодического действия с рубашкой для подогрева (рис. 9.5) [10]. Каучук вначале смешивают с пластификатором, а затем в смеситель вводят порошкообразный алюминий и другие компоненты в требуемом весовом соотношении. Смешение осуществляют при допустимой повышенной температуре для снижения вязкости смеси и необходимом вакууме рабочего объема смесителя для исключения попадания в смесь газовых включений. При этом необходимо соблюдать определенную длительность процесса, чтобы исключить преждевременное отверждение ГСВ.

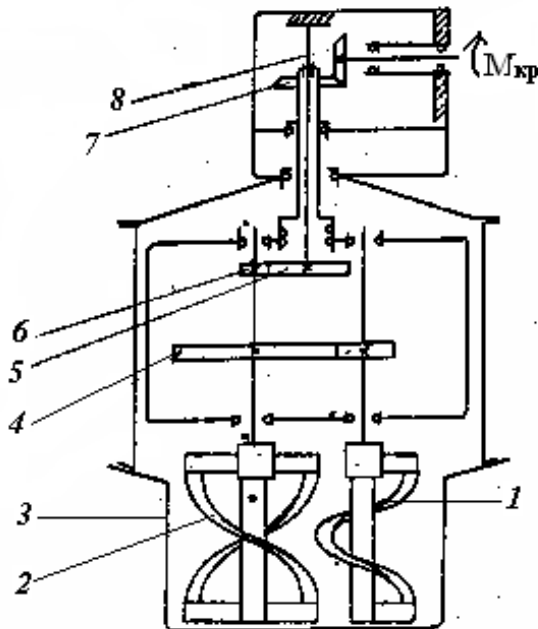


Рис. 9.5. Планетарный смеситель [10]:

- 1, 2 – лопасти; 3 – чаша; 4 – шестерня вращательного движения;
5 – неподвижная шестерня; 6 – шестерня планетарного движения;
7 – коническая шестерня привода вращения; 8 – неподвижная ось

Получив положительные результаты анализа проб смеси, ее перекачивают в передвижной контейнер-смеситель и вывозят в здание приготовления топливной массы.

Для приготовления низковязких ГСВ также используют объемные смесители типа «пьяная бочка» (рис. 9.6) [12].

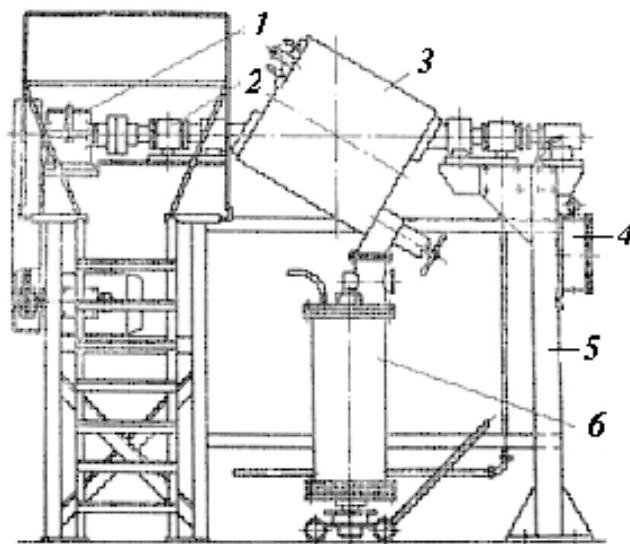
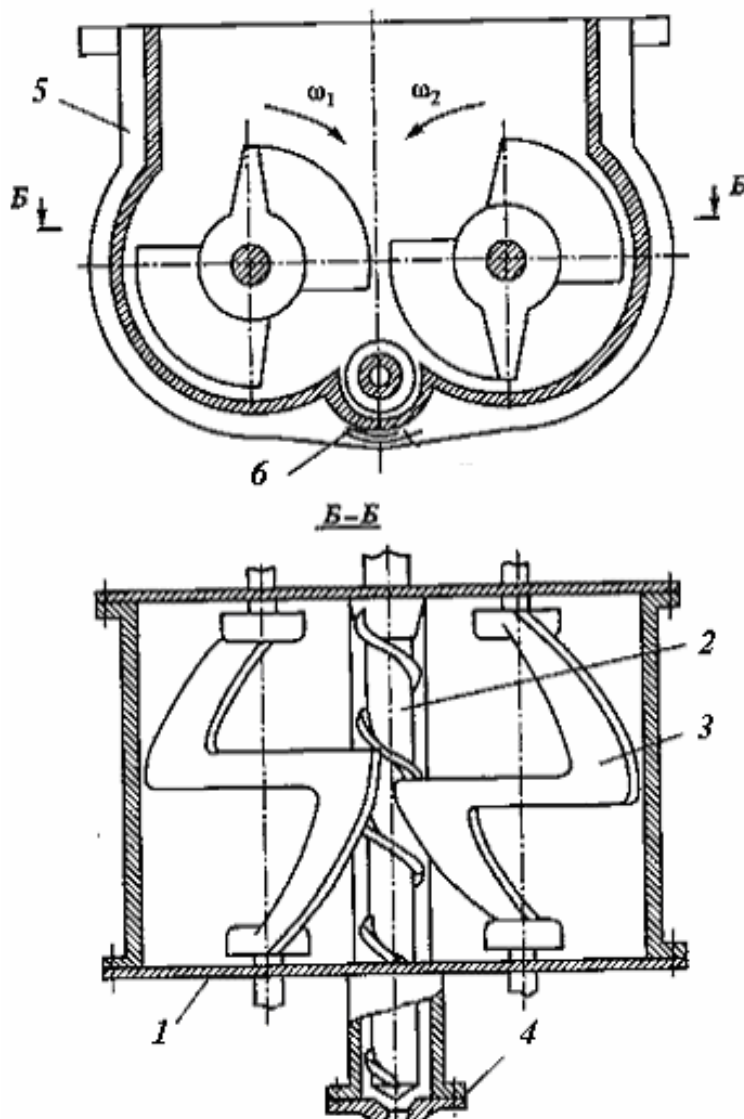


Рис. 9.6. Объемный смеситель [12]:

1 – узел привода вращения; 2 – цапфа смесителя; 3 – корпус; 4 – вакуумная система; 5 – стойка; 6 – подвижный контейнер

Для высоковязких связующих применяют двухвальные смесители с нижним выгрузным шнеком. Принципиальная схема двухроторного (двухвального) лопастного смесителя с реверсивным шнеком показана на рис. 9.7 [11]. Он состоит из камеры смешения 1 с крышкой, двух роторов 3 с Z-образными лопастями, реверсивного шнека 2. Камера смешения представляет собой корыто с двумя торцевыми стенками 5, в которых крепятся опорные подшипниковые узлы для валов лопастей и шнека. Дно камеры образовано двумя большими полуцилиндрами для размещения лопастей и третьим полуцилиндром для шнека. Корпус камеры смешения имеет полости для обогрева водой или паром. Смеситель работает следующим образом. В камеру смешения загружают необходимое количество жидких и сыпучих компонентов и включают в движение лопасти и шнек. Лопасти смесителя вращаются навстречу друг другу с различной частотой и перемешивают загруженные компонен-

ты. Навивка лопастей имеет такое направление, при котором масса обычно движется к центру корыта. Шнек транспортирует массу к задней торцевой стенке камеры и сбрасывает ее на быстроходную лопасть, что приводит к значительной интенсификации процесса перемешивания. В конце перемешивания меняется направление вращения шнека. Готовая смесь, подаваемая лопастями, выгружается шнеком через фильеру 4.



*Рис. 9.7. Двухроторный лопастной смеситель [11]:
1 – камера смешения; 2 – шнек; 3 – ротор; 4 – фильера; 5 – стенка*

Контрольные вопросы

1. Назовите основные технологические фазы подготовки компонентов СТРТ.
2. Какие типы смесителей используют в процессе сушки твердых порошкообразных окислителей?
3. Укажите основные типы оборудования для измельчения порошкообразных компонентов СТРТ.
4. Назовите основные компоненты, входящие в состав СТРТ, их функции в составе топливной массы.
5. Какое оборудование используют для смешения компонентов СТРТ и в какой последовательности?
6. Назовите основные способы межфазной транспортировки сыпучих компонентов СТРТ.

Глава 10. СМЕШЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА [3,10,14–16]

10.1. Основные физико-химические процессы при смешении компонентов топлива

Под *смешением* понимают такой феноменологический процесс, в результате которого первоначально находящиеся раздельно компоненты после равномерного распределения каждого из них в смешиваемом объеме образуют однородную смесь.

Обратным процессу смешения является процесс *сегрегации*, приводящий к разделению смеси на отдельные компоненты.

В состав смесевых топлив может входить различное число компонентов; есть композиции, состоящие из десяти компонентов различного агрегатного состояния. Соотношение масс компонентов (их массовое содержание) в смеси может изменяться в широком диапазоне величин.

Создание технологического процесса и выбор оборудования для приготовления топливных масс и формования изделий во многом определяются физическими и физико-химическими свойствами создаваемых топливных композиций, прежде всего их реологическими характеристиками.

При смешении компонентов топлива протекают сложные физико-химические процессы [7]:

- смачивание твердых частиц наполнителя жидкими компонентами с вытеснением воздуха с их поверхности и пор под действием вакуума;
- образование адсорбционно-сольватных оболочек на поверхности частиц из макромолекул и надмолекулярных образований связующего вещества и возникновение коагуляционных структур и твердофазных агломератов;
- усреднение топливного состава и упорядочение в распределении частиц различной природы и размеров в вязкой жидкой матрице связующего;

- возможное начальное взаимодействие связующего вещества с отверждающими добавками, приводящее к постепенному увеличению вязкости топливной массы.

Необходимым условием для разрушения твердофазных агломератов, образующихся на начальных стадиях процесса смешения высоконаполненных смесевых систем, является создание в их объеме достаточных для разрушения напряжений сдвига, которые возникают в циркуляционных потоках различного типа смесителей.

На характер механического движения гетерогенных топливных смесей, состоящих из сплошной вязкотекучей массы, структурированной твердыми частицами дисперсной фазы, существенно влияют скоростные деформационные свойства под действием сдвиговых напряжений.

В наше время гипотезу Ньютона о вязком трении при одномерном ламинарном изотермическом течении жидкости представляют в виде следующего выражения:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dx}, \quad (10.1)$$

где τ – касательное напряжение сдвига слоев жидкости относительно друг к другу; μ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом *динамической вязкости* или просто вязкость, (Н·с/м² или Па·с); dv/dx – градиент скорости сдвига, характеризующий изменение скорости на единице расстояния по нормали к вектору скорости.

Вязкость μ в значительной мере зависит от температуры и в меньшей мере – от давления. В условиях ламинарного течения, когда *число Рейнольдса* $Re < Re_{\text{крит}}$, вязкость является физической постоянной, определяемой молекулярной природой жидкости и ее состоянием (ее температурой и давлением). Вязкие жидкости, подчиняющиеся закону течения в форме (10.1), в *реологии* – науке о деформациях и текучести вещества получили название *ньютоновских жидкостей*.

В отличие от ньютоновских жидкостей у *неньютоновских* (структурно-вязких) жидкостей вязкость зависит от режима течения даже при малых числах Re . В зависимости от вида

функциональной связи вязкости с напряжением сдвига или градиентом скорости сдвига неньютоновские жидкости можно условно разделить на следующие группы: вязкопластичные системы, псевдопластичные жидкости (псевдопластики), дилатантные, реопектические, тиксотропные и вязкоупругие жидкости [13].

Смесевые твердые ракетные топлива в зависимости от режимов их переработки, как правило, проявляют неньютоновские реологические свойства.

Для жидкообразных дисперсных систем реологическую характеристику их одномерного течения представляют в виде следующего степенного выражения (уравнение Оствальда де Виляя):

$$\tau = m \left(\frac{dv}{dx} \right)^{n-1} \frac{dv}{dx}, \quad (10.2)$$

где m – коэффициент консистенции; n – индекс течения ($n < 1$).

Величины m и n являются реологическими константами жидкости, которые определяют экспериментально, и они связаны с понятием вязкости следующим отношением $\mu_{\text{каж}} = \frac{\tau}{dv/dx}$.

С учетом уравнения (10.2) его можно записать в виде

$$\mu_{\text{каж}} = m \left(\frac{dv}{dx} \right)^{n-1}. \quad (10.3)$$

Вязкость $\mu_{\text{каж}}$ называют *кажущейся вязкостью*. При увеличении скорости сдвига таких сред величина $\mu_{\text{каж}}$ уменьшается.

Для «твердообразных» дисперсных сред характерно наличие предела текучести τ_0 , при превышении которого материал начинает течь как вязкая жидкость. Подобное поведение свойственно высоконаполненным топливным массам, основная реологическая характеристика которых выражается уравнением Балкли-Гершеля [7]:

$$\tau = \tau_0 + m \left(\frac{dv}{dx} \right)^n, \quad \tau > \tau_0. \quad (10.4)$$

Хорошо известно, что температура оказывает значительное влияние на реологические свойства полимерных систем; при ее увеличении величина кажущейся вязкости $\mu_{\text{каж}}$ снижается. Наиболее часто используемое выражение для определения за-

висимости вязкости от температуры для конкретной полимерной системы – уравнение Аррениуса

$$\mu_{\text{каж}} = A \exp(E/RT), \quad (10.5)$$

где R – молярная газовая постоянная; T – температура; E – энергия активации; A – коэффициент, зависящий от природы полимерной системы.

Реологические характеристики топливной массы зависят как от рецептурной особенности композиций (например, физико-химических свойств полимерного связующего, количества и качества пластификаторов, наполнителей, технологических, отверждающих, каталитических и других добавок), а также от температурных и скоростных режимов деформирования при ее переработке.

К основным факторам, определяющим реологические свойства топливных масс на технологической фазе ее приготовления, относятся:

- степень наполнения, гранулометрический и морфологический состав ГМС (окислителя, ВВ, металлических порошков и других твердых наполнителей);
- вязкость связующего и энергия активации его вязкого течения;
- наличие и характер поверхностно-активных веществ;
- температура, скорости деформирования и продолжительность смешения.

Для каждого конкретного состава топливной смеси существует оптимальная степень наполнения жидкой сплошной фазы твердыми дисперсными компонентами, при которой она может перерабатываться в изделия, сохраняя необходимые литьевые свойства. Основным параметром, характеризующим литьевые свойства смеси в целом, наряду с вязкостью является ее плотность:

$$\rho = \sum_{i=1}^n m_i, \quad (10.6)$$

где m_i – масса i -й составляющей в единице объема среды; $i = 1, 2, \dots, n$).

Для смесевых композиций плотность твердой фазы ρ_T можно вычислить по следующему уравнению:

$$1/\rho_T = a_1/\rho_1 + a_2/\rho_2 + \dots + a_n/\rho_n, \quad (10.7)$$

где a_1, a_2, \dots, a_n – массовая доля каждого твердого компонента в смеси; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – плотность соответствующего твердого компонента.

Объемную долю жидкой фазы в смеси, равную отношению объема жидкой фазы в смеси к общему объему смеси, обычно выражают в следующем виде:

$$\varphi_{ж} = 1 - a_T \rho / \rho_T; \quad (10.8)$$

где a_T – массовая доля твердой фазы в смеси топлива.

Связующее расходуется на заполнение пор в объеме твердой фазы, образование адсорбционно-сольватных слоев на поверхности частиц наполнителя и жидких вязких прослоек между ними. Примыкающие к частицам вязкие слои связующего определяют среднемассовую скорость течения смеси и ее реологические свойства. По этим прослойкам происходит течение топливных масс [7].

При использовании многофракционных рабочих смесей ПХА (см. разд. 9.3) мелкие частицы заполняют поровое пространство между крупными частицами и вытесняют из него связующее в пространство между частицами.

Следует отметить, что и другие наполнители смесевых твердого топлива, например Al, октоген и т.п., являются полифракционными средами и имеют достаточно широкий спектр распределения частиц по размерам.

Если доля твердой фазы в смеси достаточно велика, то тонкие адсорбционно-сольватные оболочки соприкасаются и возникает сплошная структурная сетка, и реологические свойства резко ухудшаются. В случае, когда толщина адсорбционных слоев составляет единицы нанометров, можно ожидать, что возникающие при этом молекулярные силы полностью перекроют расстояние между частицами. Процесс еще более осложнится, когда частицы будут соприкасаться между собой

по зонам контакта и образуют единую сетку (конгломерат). Площадь контактирующей поверхности адсорбционных слоев может еще больше увеличиться, если на частицы действуют какие-либо внешние силы, возникающие, например в процессе смешения топливной массы [14].

Характер изменения реологических свойств топливной массы в процессе смешения носит достаточно сложный и противоречивый характер. На ранних стадиях процесса смешения вязкость топливных масс уменьшается, так как протекают процессы механического усреднения и равномерного распределения частиц наполнителя в объеме смеси. Затем $\mu_{\text{каж}}$ может увеличиваться за счет частичного измельчения крупных частиц и увеличения их удельной поверхности; возможно, начинают сказываться начавшиеся процессы отверждения топливной массы.

С повышением температуры вязкость топливной массы снижается до тех пор, пока не начнутся процессы отверждения, что вызовет повышение вязкостных характеристик топлива и ухудшение его реологических свойств.

10.2. Критерии оценки качества смеси

В любом микрообъеме идеально однородной смеси должны находиться частицы всех компонентов в количествах, определяемых их заданным соотношением. Однако такое расположение частиц в объеме топливной смеси в действительности не наблюдается. В произвольно выбранных микрообъемах смеси возможно большое число сочетаний частиц различных компонентов, т.е. их распределение в смеси – величина случайная. Поэтому большинство методов оценки однородности (или качества) смеси основаны на методах *статистического анализа*.

Для упрощения расчетов все смеси условно считаются двухкомпонентными, состоящими из так называемого *ключевого компонента* и *условного*, включающего все остальные компоненты смесей. Подобный прием позволяет оценивать однородность смеси параметрами распределения одной случайной величины – содержанием ключевого компонента в пробах сме-

си. В качестве ключевого компонента обычно выбирают такой компонент, который либо легко подвергается количественному анализу, либо его распределение в смеси строго регламентировано техническими требованиями на готовую смесь.

В качестве критерия оценки однородности смеси наиболее часто используют *коэффициент вариации* V_c , который выражают в долях от единицы или в процентах

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (c_i - \bar{c})^2}, \quad (10.9)$$

где \bar{c} – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех n пробах смеси, %; c_i – концентрация ключевого компонента в i -й пробе смеси, %.

Применительно к процессу смешивания различных материалов этот критерий называют *коэффициентом неоднородности*, так как с его увеличением неравномерность распределения компонентов в смеси возрастает.

Для одной и той же смеси значения критерия V_c зависят от массы проб и их числа. Чем меньше масса отбираемых проб, тем больше значение V_c . Количество проб n , отбираемых из смеси и подвергаемых затем количественному анализу на содержание в них ключевого компонента, определяет надежность оценки качества смеси.

Если исследуемая величина содержания ключевого компонента в смеси подчиняется нормальному закону распределения, что обычно имеет место на практике, то можно оценить *доверительную вероятность* α того, что величина \bar{c} отличается от истинного значения $c_{ис}$ на величину, меньшую, чем Δc :

$$P[(\bar{c} - \Delta c) < c_{ис} < (\bar{c} + \Delta c)] = \alpha. \quad (10.10)$$

Обычно ограничиваются доверительной вероятностью 0,9 или 0,95; точность оценки определяется формулой

$$\Delta c = \sigma_c t_c / \sqrt{n}, \quad (10.11)$$

где $\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n-1}}$ – статистическое среднеквадратическое отклонение, $V_c = \sigma_c / \bar{c}$; t_c – коэффициент Стьюдента, величина которого зависит от объема выборки n и заданной доверительной вероятности α (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Значения коэффициента Стьюдента

<i>n</i>	Значения t_c при α				<i>n</i>	Значения t_c при α			
	0,90	0,95	0,98	0,99					
2	6,31	12,71	31,82	63,66	9	1,86	2,31	2,90	3,36
3	2,92	4,30	6,96	9,92	10	1,84	2,26	2,76	3,25
4	2,35	3,18	4,54	5,84	15	1,76	2,14	2,60	2,98
5	2,13	2,78	3,75	4,60	20	1,73	2,09	2,53	2,86
6	2,01	2,57	3,65	4,03	30	1,70	2,04	2,46	2,76
7	1,94	2,45	3,14	3,71	60	1,67	2,00	2,39	2,66
8	1,90	2,36	2,97	3,56	∞	1,65	1,96	2,33	2,58

В ряде случаев при экспериментальных исследованиях необходимо определить минимальный объем выборки (число опытов) n , который с заданной точностью Δc и доверительной вероятностью α позволит найти искомую величину. При распределении случайной величины по нормальному закону и при известном среднеквадратическом отклонении σ_c или коэффициенте вариации V_c

$$n = \frac{t_c^2 \sigma_c^2}{(\Delta c)^2} = \frac{t_c^2 \sigma_c^2}{\varepsilon^2 c^2} = \frac{t_c^2 V_c^2}{\varepsilon^2}, \quad (10.12)$$

где ε – относительная точность измерения, $\varepsilon = \Delta c / c$.

Если значения σ_c или V_c неизвестны, то их определяют по результатам предварительных исследований.

Для смесей высокой однородности коэффициент неоднородности $V_c < 2 \%$, хорошего качества $2 \% < V_c < 5 \%$, низкого качества $5 \% < V_c < 8 \%$.

10.3. Кинетика процесса смешения

Экспериментальные зависимости V_c от времени смешения t , полученные для различных конструкций периодических смесителей и режимов их работы, называются *кинетическими кривыми смешения*. Они имеют три характерных участка (рис. 10.1), каждый из которых соответствует определенному по времени периоду смешения.

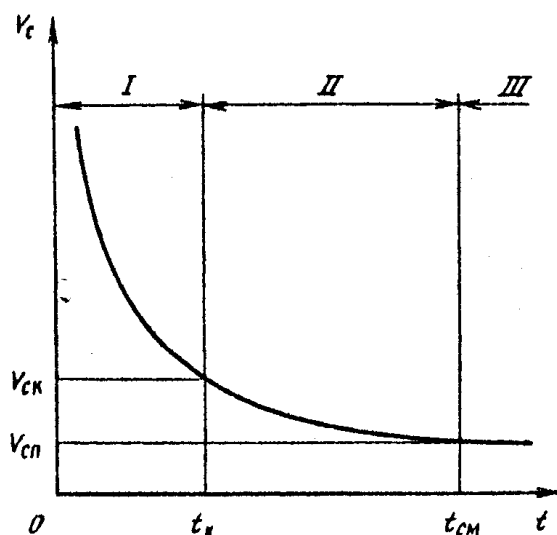


Рис. 10.1. Кинетическая кривая смешения в аппаратах периодического действия

В периоде *I* преобладает процесс смешения по сравнению с процессом сегрегации. За счет уменьшения агрегатов из одинаковых частиц и конвективного переноса их по внутреннему объему смесителя происходит резкое снижение коэффициента неоднородности.

В периоде *II* скорость процесса смешения становится соизмеримой со скоростью сегрегации, поэтому значения V_c со временем изменяются незначительно. Процесс смешения реализуется в основном за счет перемещения и перераспределения отдельных частиц относительно друг друга и получил название диффузионного смешения.

В периоде *III* элементарные процессы смешения (конвективное и диффузионное смешение) по скорости равны процессу сегрегации, поэтому в некоторый момент времени t_{cm} , называемый оптимальным временем смешения, коэффициент неоднородности V_c становится величиной постоянной.

Предельно достижимое значение коэффициента неоднородности V_c конкретной смеси определяется экспериментально и зависит от многих факторов: физико-механических свойств, конструкции смесителя и режима его работы.

Кинетику процесса периодического смешения чаще всего определяют по уравнению

$$V_c(t) = aV_{c0} e^{-\Phi t}, \quad t \leq t_{\text{см}}, \quad (10.13)$$

где $V_c(t)$ – коэффициент неоднородности смеси к моменту времени t ; V_{c0} – коэффициент неоднородности смеси в начальный момент смешения (определяется соотношением компонентов смеси); a – коэффициент пропорциональности; Φ – функция (или параметр), зависящая от физико-механических свойств смеси, геометрических размеров и технологических параметров работы смесителя и имеющая размерность, обратную времени.

Следует отметить, что величина V_c зависит не только от неоднородности смеси за счет процесса смешения, но и от неточности и погрешности работы дозаторов, особенно в аппаратах непрерывного действия. Необходимая однородность по содержанию компонентов состава не всегда сопровождается адекватным выравниванием реологических характеристик топливной массы и физико-механических свойств готовых изделий. При смешении компонентов происходит не только чисто механическое их усреднение, но одновременно протекают указанные ранее сложные физико-химические процессы. Они формируют первичную структуру топливной массы, которая затем претерпевает изменения на стадии отверждения и передается готовым изделиям.

При оценке качества смешения композиций смесового твердого топлива кроме выходных оценочных технологических показателей (степень однородности распределения компонентов, физико-химические характеристики отвержденного состава и др.) требуется также анализ и определение реологических характеристик перерабатываемого материала во время проведения процесса – реодинамические характеристики, по которым можно судить не только о протекании процесса смешения, но и об эффективности смесительных аппаратов разного типа.

Контрольные вопросы

1. Какие основные физико-химические процессы происходят при смешении компонентов СТРТ?
2. Дайте характеристику основным реологическим свойствам СТРТ.
3. Как влияет температура на реологические свойства СТРТ?
4. Определите плотность композиции СТРТ по плотности составляющих компонентов.
5. Какими параметрами можно характеризовать качество процесса смешения?
6. Дайте характеристику кинетической кривой процесса смешения в аппаратах периодического действия.
7. Что такое реодинамика и какие технологические процессы она характеризует?

Глава 11. ПРИГОТОВЛЕНИЕ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА [7,10,15–18]

11.1. Приготовление топливной массы методом свободного литья

В результате исследований было установлено, что методом свободного литья перерабатывают составы, имеющие следующие характеристики: $\mu_{\text{каж}} \leq 6 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\tau_0 < 500 \text{ Па}$; коэффициент растекаемости $K_p \geq 0,3$. Его определяют на специальном приборе по относительному изменению начального диаметра $d_0 = 30 \text{ мм}$ цилиндрического образца высотой 30 мм до диаметра d_k как $K_p = (d_0 - d_k) / d_0$ за 30 мин.

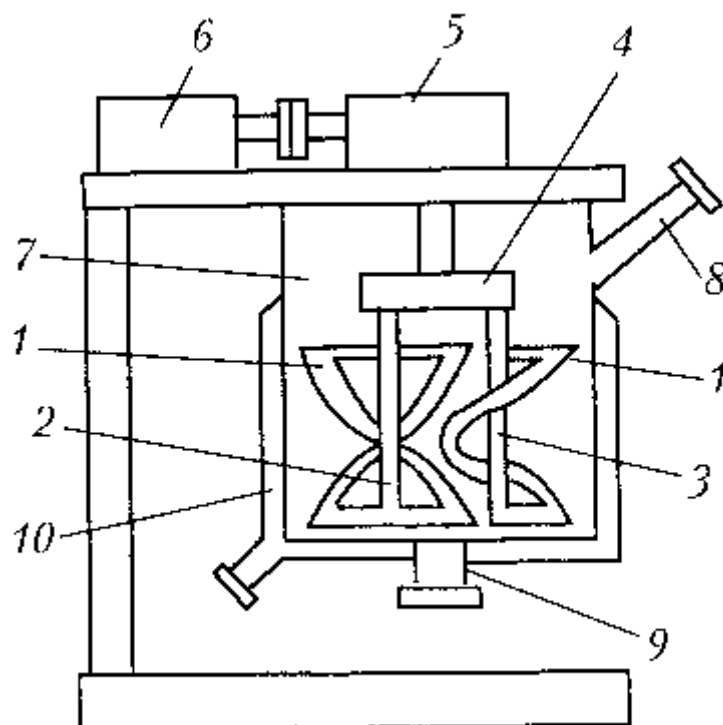
Для приготовления топливной массы методом свободного литья используют аппараты двух конструкций:

- емкостные смесители с мешалками;
- объемные смесители.

Особое внимание в конструкциях смесителей уделяют конфигурации внутренней поверхности аппаратов и узлам и деталям, которые наиболее важны при перемешивании композиций в этих аппаратах и при их опорожнении.

11.1.1. Смесители с перемешивающими устройствами

На рис. 11.1 показана принципиальная схема планетарного смесителя с мешалками геликоидального или спирального типа. Спиральная навивка 1 у мешалки 2 выполнена двухзаходной с шагом в два раза меньше шага навивки спирального элемента мешалки 3. Это позволяет интенсифицировать процесс смешения, устраняет застойные зоны в периферийных областях смешиваемого объема массы и создает достаточно однородные поля гидродинамических потоков в перерабатываемом материале. Частоту вращения ведущего вала планетарного механизма регулируют с помощью редуктора 5, приводимого в действие электродвигателем 6. Для поддержания требуемой температуры топливной массы в процессе ее смешения аппарат снабжен рубашкой 10 для термостатирования водой.

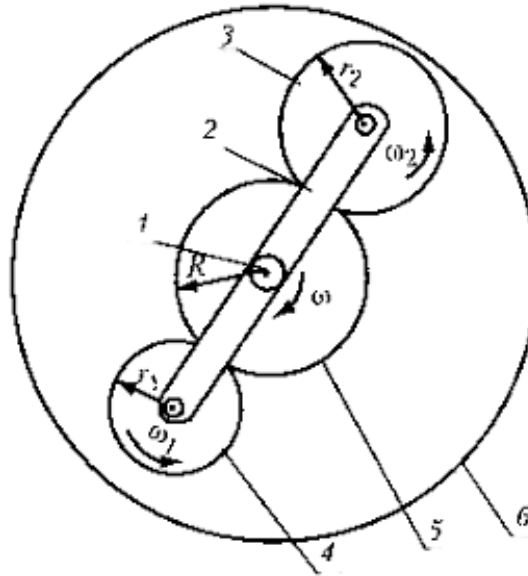


*Рис. 11.1. Планетарный смеситель со спиральными мешалками [15]:
1 – мешалки; 2, 3 – оси мешалок; 4 – планетарный механизм;
5 – редуктор; 6 – электродвигатель; 7 – чаша; 8, 9 – загрузочный и вы-
грузной патрубки; 10 – рубашка*

Конструкция планетарного механизма 4 вращения мешалок может иметь внутреннее и внешнее зацепление венцовой шестерни и шестерен-сателлитов (рис. 11.2). Скорости вращения мешалок рассчитывают по известным из теоретической механики соотношениям:

$$\omega_1 = \omega \frac{R-r_1}{r_1} \quad \text{и} \quad \omega_2 = \omega \frac{R-r_2}{r_2} . \quad (11.1)$$

В работах [15,17] предложена приближенная методика аналитического расчета мощности, потребляемой при перемешивании вязких сред в планетарных смесителях с мешалками спирально-ленточного типа, основанная на обобщенной формуле Ньютона-Кармана для силы гидравлического сопротивления, возникающей при обтекании тела произвольной формы потоком жидкости.



*Рис. 11.2. Схема планетарного механизма вращения мешалок [15]:
1 – вал смесителя; 2 – водило; 3, 4 – шестерни-сателлиты; 5 – венцовая шестерня; 6 – корпус смесителя*

Одним из важных показателей интенсивности смешения компонентов топлива является *удельная мощность* $N_{уд} = \tau_{ij} \dot{\gamma}_{ij}$ (τ_{ij} , $\dot{\gamma}_{ij}$ – соответственно компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций).

Для практических целей обычно используют средние значения $\overline{N_{уд}}$ по объему материала в смесителе

$$\overline{N_{уд}} = \frac{N}{V} = \frac{M_{кр} \omega}{V}, \quad (11.2)$$

где N – потребляемая мощность в процессе смешения; $M_{кр}$ – крутящий момент на валу мешалки; ω – частота вращения мешалки.

Следует отметить, что определяемая из выражения (11.2) $\overline{N_{уд}}$ не характеризует конкретную ситуацию в структуре потоков и возникающего напряженно-деформационного состояния в разных зонах потока перерабатываемой массы.

Поскольку удельная мощность обусловлена характером течения и интенсивностью силовых воздействий, возникающих в потоке, она может быть использована при физическом моделировании процессов смешения на уменьшенных геометрически подобных аппаратах, например при установившемся режиме в виде критериального уравнения

$$Eu = f(Re, Fr) = 0 \quad (11.3)$$

Для сред, течение которых происходит согласно степенному реологическому закону Оствальда де Вилля (10.2):

$$Eu = \frac{N_{y0}}{\rho \omega^3 R^2}; Re = \frac{\omega^{2-n} R^2 \rho}{k}; Fr = \frac{\omega^2 R}{g}; \rho - \text{плотность топливной мас-}$$

сы; g – ускорение свободного падения; ω – угловая частота относительного вращения мешалки; R – радиус, траектории движения мешалки.

Для установления длительности процесса смешения компонентов топлива может быть использован еще один важный показатель – *средняя удельная работа*:

$$\overline{A_{y0}} = \int_0^{t_{cm}} N_{y0}(t) dt, \quad (11.4)$$

где t_{cm} – время процесса смешения композиции от начала загрузки всех компонентов топлива в смеситель до достижения необходимой степени смешения, например требуемого коэффициента неоднородности V_c .

Удельная работа $\overline{A_{уд}}$ также служить одним из параметров при моделировании процесса смешения на аппаратах с малыми габаритами, но с натурными составами. Реодинамические условия на модели должны в большой мере соответствовать натурным условиям, чтобы на модели достигать примерного качества смешения, как и на натурном аппарате [15,17].

Смесители с перемешивающими устройствами имеют некоторые недостатки. Известно, что у емкостных аппаратов относительно небольшая теплообменная поверхность, пропорциональная $\sim D^2$ (D – диаметр аппарата). Тепловыделения в объеме топливной массы при смачивании жидкими компонентами порошкообразных наполнителей и диссипативная теплота в результате вращения мешалок в вязкой среде пропорциональны $\sim D^3$. Несоответствие между количеством выделяемой теплоты и возможным количеством отводимой теплоты через теплоотводящую поверхность рубашки смесителя приводит к повышению температуры в топливной массе. Верхний допустимый температурный уровень лимитируется не только установленными правилами техники безопасности, но и тем, что в смесителе могут начаться процессы отверждения связующего с рез-

ким повышением вязкости топливной массы и полной потерей литевых свойств.

В этом отношении более предпочтительны объемные (барабанные) смесители.

11.1.2. Объемные смесители барабанного типа

Объемный барабанный смеситель (рис. 11.3) представляет собой барабан 1, который внутри имеет симметричную форму цилиндра со сферическими или плоскими торцевыми стенками. Снаружи корпус смесителя имеет рубашку для обогрева или охлаждения, разделенную ребрами жесткости на отдельные секторы. Опорные цапфы 3 с полыми валами приварены к торцам смесителя и установлены по диагонали в осевом сечении цилиндра, так что ось цилиндра имеет значительный угол наклона к горизонтали, что обеспечивает значительное повышение интенсивности перемешивания топливных композиций.

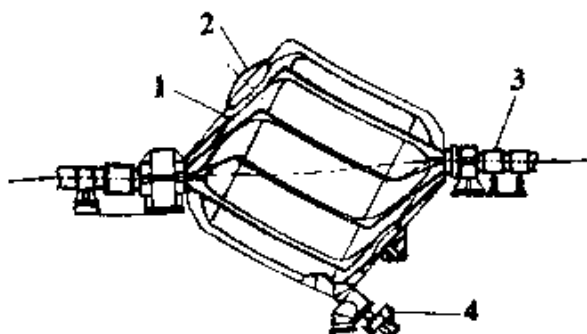


Рис. 11.3. Схема объемного смесителя [7]:

1 – корпус; 2 – загрузочный люк; 3 – опоры; 4 – выгрузной люк с затвором

На полых валах закреплены муфты для подвода и отвода теплоносителя, сжатого воздуха к затвору сливного люка и пробоотборнику, а также системы вакуумирования рабочей полости смесителя. Барабан имеет люк 2 для загрузки компонентов в смеситель и сливной люк 4 для удаления готовой топливной массы. Порошкообразные и жидкие компоненты могут подаваться в смеситель и через полые цапфы. Связующее может быть подготовлено непосредственно в смесителе перед загрузкой ПХА.

После заполнения смесителя всеми компонентами в нужном объеме в аппарате создают необходимое разрежение для удаления воздуха и проводят процесс смешения.

134

Степень заполнения смесителя перерабатываемым продуктом составляет $\psi \approx V_T/V_{\text{ап}} = 0,2-0,4$; скорость вращения барабана $n \approx 4-8$ об/мин. Для каждого конкретного состава топлива устанавливают нужную температуру, скорость вращения барабана, глубину вакуума, степень заполнения смесителя и продолжительность процесса.

Технологическую фазу приготовления смесового топлива осуществляют в автоматизированном режиме без присутствия людей. Контроль и управление процессом проводят дистанционно с выносного пульта, куда в автоматизированном режиме по разработанным программам поступают данные электронных и оптических мониторинговых систем.

Способ приготовления топлива в объемных барабанных смесителях отличается большей безопасностью по сравнению с другими, так как в смесителях этого типа отсутствуют механические смешивающие устройства, непосредственно воздействующие на топливную массу.

Процесс периодического смешения имеет определенные преимущества перед непрерывным процессом, так как проще получить высокую точность дозирования компонентов смеси, лучшее усреднение состава по объему и, как следствие, меньшее рассеивание характеристик отформованных ракетных зарядов.

Для приближенного расчета параметров процесса движение топливной массы в барабанном смесителе обычно моделируется течением вязкой жидкости в горизонтальном цилиндрическом аппарате [18]. Метод основан на приближенном аналитическом решении уравнений движения вязких сред Навье-Стокса при $Re \leq 1$, когда имеет место так называемое «ползущее течение» и инерционные силы не учитываются. Для плоской (двухмерной) задачи делают допущение о том, что свободная поверхность в вихревой (циркуляционной) зоне представляет собой плоскость, наклоненную к горизонту под некоторым углом γ , зависящим от скорости вращения барабана (рис. 11.4).

В этом случае уравнение сохранения импульса имеет следующий вид:

$$g \sin \gamma = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\tau}{dr} + 2 \frac{\tau}{r} \right). \quad (11.5)$$

С учетом граничного условия при $r = R_1$ касательное напряжение $\tau = 0$, решением уравнения (11.5) для условной ньютоновской среды будет

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{1,5 \mu_{\text{каж}} \omega}{\rho g R_0} \right), \quad (11.6)$$

где $R_0 = \frac{R_2}{6(1-\alpha^2)} [3(1-\alpha^2) - 2(1-\alpha^3) - 6\alpha^2 \ln(1/\alpha) - 3\alpha^2(1-\alpha^2)]$.

Зная угол γ и радиус центра тяжести сегмента r_0 , заполненного топливной массой, среднюю удельную мощность определяем по формуле

$$\overline{N}_{\text{уд}} = g \rho r_0 \omega \sin \gamma, \quad (11.7)$$

где величина r_0 зависит от степени загрузки смесителя ψ и может быть найдена расчетным путем в виде зависимости $r_0/R_0 = f(\psi)$.

Расчеты показали, что при $\psi = 0,05-0,4$ можно считать $r_0/R_0 = 0,94 \psi^{-4/3}$. Тогда формулу (11.7) можно представить как [18]

$$\overline{N}_{\text{уд}} = 1,4 \mu_{\text{каж}} \omega^2 \psi^{-4/3} \quad (11.8)$$

или в безразмерном виде

$$T = \frac{\overline{N}_{\text{уд}} \mu_{\text{каж}}}{(g \rho R_2)^2} = 1,4 \psi^{-4/3} W^{-2}, \quad (11.9)$$

где $W = \rho g R_2 / (\omega \mu_{\text{каж}})$.

В случае смещения масс с низкой адгезией к стенкам смесителя, когда $1/W = 0,010-0,012$ при $\psi = 0,2$ и $1/W = 0,018-0,020$ при $\psi = 0,3$, наблюдается достаточно удовлетворительное соответствие между приближенными расчетными данными и практическими результатами [15]. Поэтому изложенный метод применяют для приближенных инженерных расчетов в широком диапазоне изменения скоростей вращения горизонтальных смесителей.

Приведенная методика позволяет также оптимизировать технологические параметры процесса смещения компонентов смесового топлива (например, скорость вращения ротора смесителя и степень его загрузки) при изменении реологических характеристик смесей в тех случаях, когда необходима максимальная интенсивность процесса [15].

11.2. Приготовление топливной массы методом литья под давлением

Методом литья под давлением перерабатывают топливные массы со следующими характеристиками: $\mu_{\text{каж}} \sim 10^3\text{--}10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\tau_0 = 0.5\text{--}6,0 \text{ кПа}$; $K_p < 0,3$.

Для получения и переработки топливных масс этим методом используют смеситель непрерывного действия (СНД), (рис. 11.5).

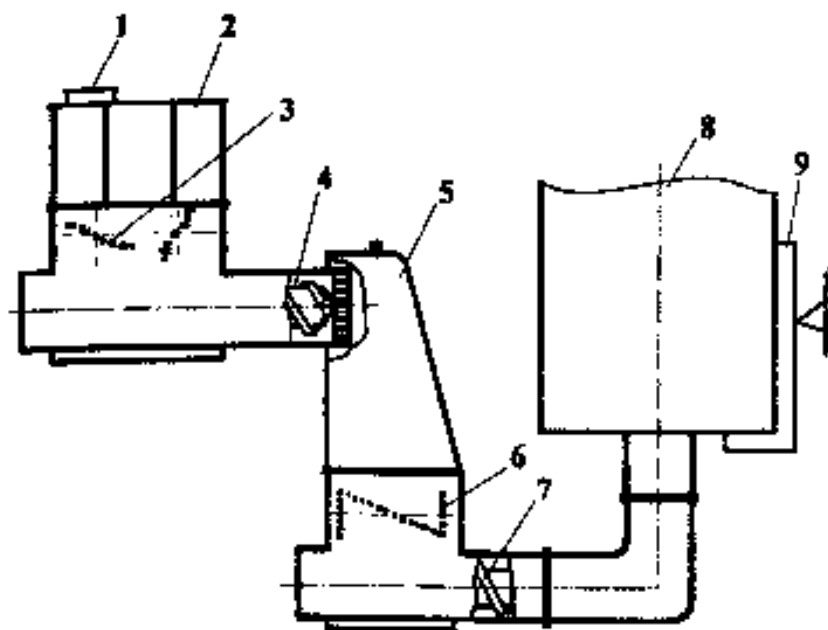


Рис. 11.5. Принципиальная схема смесителя СНД [7]:

- 1 – загрузочный люк; 2 – бункер предварительного смесителя;
3 – предварительный смеситель; 4 – первичный шнек;
5 – вакуумная камера; 6 – второй смеситель; 7 – напорный шнек;
8 – пресс-форма (корпус двигателя);
9 – крепежная опора*

Установка СНД включает в себя предварительный смеситель, который имеет бункер 2 с загрузочным люком 1 для подачи компонентов или предварительно подготовленной топливной массы. В периферийную зону бункера подают жидкое связующее, образующее подобие цилиндрической оболочки (чулка), в которую подают порошкообразные компоненты. В таком состоянии масса поступает в смеситель 3 с Z-образными лопастями, вращающимися навстречу друг другу, в которых осуществляется первичное смешение компонентов топлива.

В нижней части корпуса предварительного смесителя установлен шнек 4, в который топливная масса поступает через нижнее продольное окно смесителя 3. Здесь, продвигаясь по длине винтовой нарезки, она подвергается интенсивному перемешиванию под действием сдвиговых деформаций и возникающему давлению. На выходном участке шнека установлена формирующая решетка 6, которая разделяет топливную массу на отдельные шнуры, поступающие в вакуумную камеру 5 и во второй смеситель 6 с Z-образными лопастями. Формирующая решетка также оказывает тормозящее действие на продвижение топливной массы. В результате создается необходимый градиент давления вдоль оси шнека, вызывающий интенсивные напряжения сдвига и деформации в топливной массе.

Корпус предварительного смесителя снабжен рубашкой, а шнек специальными полостями для нагрева или охлаждения водой (для термостатирования).

В камере и во втором смесителе создается разрежение, благодаря чему из топливной массы удаляются воздух и другие газообразные вещества. Далее топливная масса попадает в нагнетающий шнек 7, к патрубку которого присоединяют пресс-форму или корпус двигателя 8; они установлены на опоре 9. С помощью шнека топливная масса нагнетается в пресс-форму или корпус ракетного двигателя при давлении 0,5 МПа [10].

В корпус второго смесителя и его шнек также подается вода с нужной температурой для термостатирования системы.

В аппарате СНД совмещаются операции смешения компонентов, вакуумирование топливной массы и ее нагнетание в пресс-форму или корпус двигателя, которые могут располагаться горизонтально или вертикально. Наиболее предпочтительным является вертикальный способ течения топливной массы, когда профиль свободной поверхности топливной массы остается равномерным по сечению потока. По окончании заполнения пресс-формы или корпуса двигателя (изложницы) работа установки прекращается, происходит дистанционное отсоединение изложницы с топливом от аппарата СНД и ее транспортируют на фазу отверждения изделия.

Крупногабаритные заряды формируют при вертикальном положении корпуса двигателя с подачей топливной массы снизу. Процесс осуществляется автоматически с помощью дистанционного управления, метод литья под давлением применяется при производстве зарядов массой до 50 т.

Таким образом, установка СНД непрерывно работает в период изготовления одного изделия, затем подсоединяется новая изложница, и процесс ее заполнения топливом продолжается.

Основное назначение данной фазы производства заключается в получении монолитного заряда, однородного по химическому составу, скорости горения и физико-механическим свойствам. Чтобы выполнить эти требования, необходимо стабильное заданное долевое соотношение всех компонентов топлива, строго определенная загрузка топливной массы в смесителях, температура топливной массы и другие параметры. Важно обеспечить безопасное ведение процесса и надежность работы оборудования, а также получить эффективные экономические показатели процесса.

Способ литья под давлением с использованием СНД оказался весьма работоспособным и положительно зарекомендовал себя в производстве, позволив перерабатывать топливные массы с высокой вязкостью.

Вместе с тем аппараты СНД имеют и недостатки, главным образом:

- сложность конструкции, сочетающей в себе большое число дозирующих устройств непрерывного действия, которые по точности уступают дозаторам периодического действия;
- в процессе смешения оказывается силовое механическое воздействие на топливную массу, что стало причиной возникновения загорания и взрыва;
- относительно большое скопление топливной массы в совмещенных процессах смешения и формования зарядов.

11.3. Подготовка пресс-форм, корпусов двигателей и технологической оснастки

При подготовке пресс-форм, в которых формируют вкладные ракетные заряды, проводят следующие операции:

- обезжиривание внутренней поверхности и нанесение на нее антиадгезионного покрытия;
- установка и закрепление иглы с антиадгезионным наружным покрытием при формировании зарядов с каналом (рис. 11.6);
- обработка антиадгезионным покрытием крышек пресс-формы и других элементов технологической оснастки, контактирующих с топливной массой.



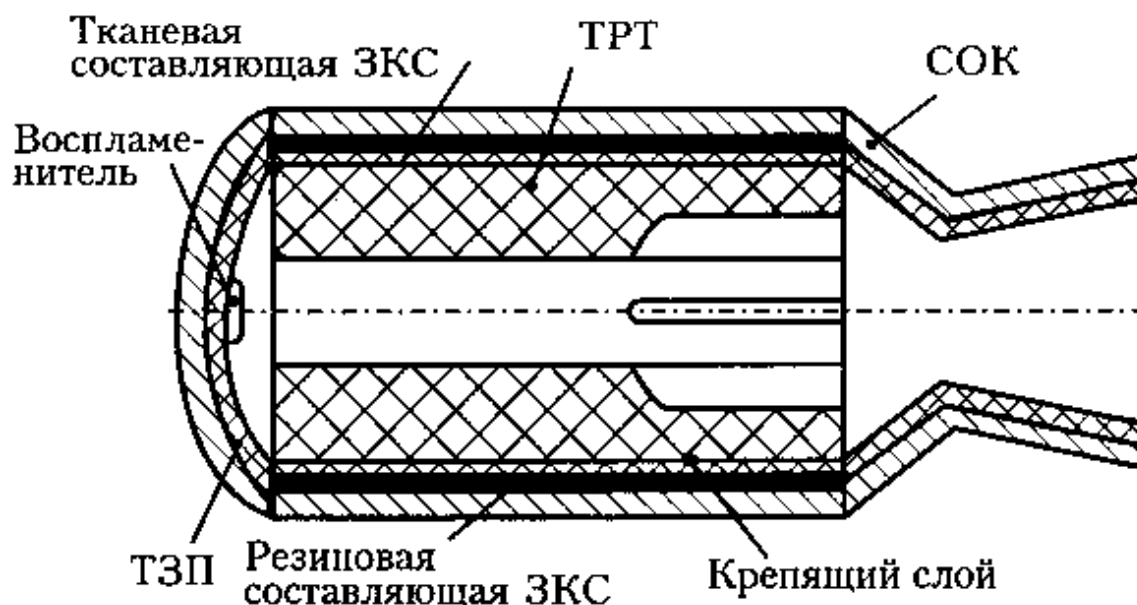
Рис.11.6. Внешний вид фигурной иглы для формирования канала сложной формы в заряде СТРТ [7]

Антиадгезионное покрытие предотвращает прилипание материала заряда к пресс-форме и игле. После отверждения и охлаждения заряд сравнительно легко извлекается из пресс-формы, а из самого заряда извлекается игла. Формующие элементы оснастки удаляют при помощи пресс-станков различной конструкции и специальных грузоподъемных механизмов.

В качестве антиадгезионного покрытия используют различные композиционные составы в соответствии с рецептурой топливной массы например, фторопласт и соединения на его

основе. Такие покрытия наносят на поверхность несколькими слоями, которые закрепляют в результате последующей тепловой обработки [7].

Корпуса двигателей, в которых формируют скрепленные заряды, имеют внутреннюю поверхность с «защитно-крепящим покрытием» (ЗКП) (рис. 11.7); оно предохраняет корпус двигателя от воздействия образующихся продуктов сгорания топлива (защитный слой) и обеспечивает скрепление топливного блока с оболочкой корпуса РДТТ (крепящий слой).



*Рис. 11.7. Принципиальная схема крепления заряда в РДТТ [20]:
ТРТ – твердое ракетное топливо; ЗКС – защитно-крепящие слои;
ТЗП – теплозащитное покрытие*

Защитный слой ЗКП представляет собой двухслойный материал, состоящий из специальной резины и асболавсановой или капроновой ткани и обладающий теплозащитными и эрозиянностойкими свойствами. Сначала на внутреннюю поверхность корпуса выкладывают защитный слой из резины и тканевого материала, затем наносят крепящий состав – жидкую композицию активного олигомера с усиливающим наполнителем, которая создает надежный адгезионный шов между топливом заряда и ЗКС.

Более рациональным является применение однослойных материалов, совмещающих функции теплозащиты и крепящего состава. Для этой цели используют специальные вязкие пасты (бронемасса), как правило, на основе связующих, входящих в состав топлива.

На рис. 11.8 показана принципиальная схема нанесения бронемассы на внутреннюю поверхность корпуса двигателя. Компоненты бронесостава смешивают под вакуумом в емкостном аппарате периодического действия 6. Корпус 2 установлен на роликовых опорах тележки специальной конструкции 1 и совершает вращательное и возвратно-поступательное движение.

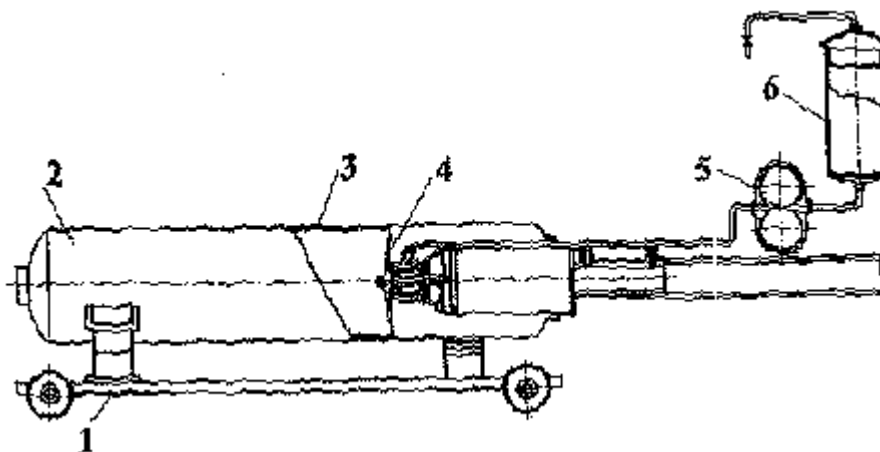


Рис. 11.8. Принцип действия установки для нанесения бронирующего состава [7]:

*1 – платформа; 2 – корпус двигателя; 3 – бронепокрывание;
4 – распылитель; 5 – насос; 6 – смеситель бронемассы*

Приготовленный бронесостав наносится на внутреннюю поверхность корпуса двигателя 3 распылителем 4, куда подается из емкости 6 шестеренчатым насосом 5.

Отверждение бронесостава производится при термостатировании корпуса в специальных кабинах при 50–70 °С.

В отличие от вкладных зарядов, скрепленный с корпусом заряд является несущим элементом всей конструкции «корпус-заряд». С изменениями температуры заряд, как и корпус, меняет свои размеры; при этом связь корпуса и заряда как единого целого не должна нарушаться. Поэтому используемые топлива

и ЗКС должны сохранять сочетание высоких адгезионных свойств с высокоэластическими характеристиками при отрицательных температурах вплоть до -70°C [19,20].

Контрольные вопросы

1. Назовите существующие способы приготовления СТРТ и охарактеризуйте их. Какие смесители используют для приготовления топливной массы методом свободного литья?

2. Дайте описание планетарного смесителя с перемешивающими устройствами. Как определяется удельная мощность смесителя, потребляемая на смешение компонентов СТРТ?

3. Дайте описание объемного барабанного смесителя. Как определяется удельная мощность смесителя, потребляемая на процесс смешения компонентов СТРТ?

4. Дайте краткое описание смесителя СНД. Для каких СТРТ используют смесители этой конструкции?

5. Назовите причины, ограничивающие использование аппаратов СНД.

6. Какие основные технологические операции проводят при подготовке пресс-форм и корпусов двигателей, в которых осуществляется формование изделий из СТРТ?

Глава 12. ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА МЕТОДОМ СВОБОДНОГО ЛИТЬЯ [3,4,7,10,15,19]

12.1. Формование изделий из литьевых топливных композиций

Сущность формования изделий истечением композиций из емкостей заключается в том, что приготовленная в смесителе вязкая литьевая композиция под действием силы тяжести или небольшого избыточного давления перемещается из смесителя или промежуточной сливной емкости по массопроводу в одну или несколько пресс-форм (корпусов), где приобретает заданные габариты и форму. В связи с этим одним из главных требований к технологическим свойствам композиций, перерабатываемых способом свободного литья (СЛ), является их способность к растеканию под действием силы тяжести по дну пресс-формы и в зоне свободной поверхности потока при заполнении пресс-формы. При этом необходимо заполнять пресс-формы или корпуса ракет в ограниченный промежуток времени с обеспечением бездефектного изготовления изделий и с минимизацией остатков композиции в емкости по окончании процесса истечения.

Формование изделий способом свободной заливки (рис. 12.1) производится за счет свободного истечения вязкой подвижной композиции из сливной емкости *1* через клапан *4*, массопровод *2* и разделитель *5* в пресс-форму *3* (пресс-формы) или в корпус двигателя. Сливная емкость может иметь цилиндроконическую (рис. 12.1, *а*) или цилиндросферическую форму (рис. 12.1, *б*) – «пьяной бочки». С целью сокращения длительности процесса истечения топливной массы из сливной емкости в ней в ряде случаев создают небольшое избыточное давление Δp по отношению к давлению в пресс-формах.

Формование изделий состоит из следующих технологических этапов:

- истечение топливной массы непосредственно из смесителя или раздаточной сливной емкости;
- течение топливной массы в массопроводе, связывающем смеситель с пресс-формой или корпусом двигателя;
- заполнение топливной массой пресс-формы (корпуса двигателя).

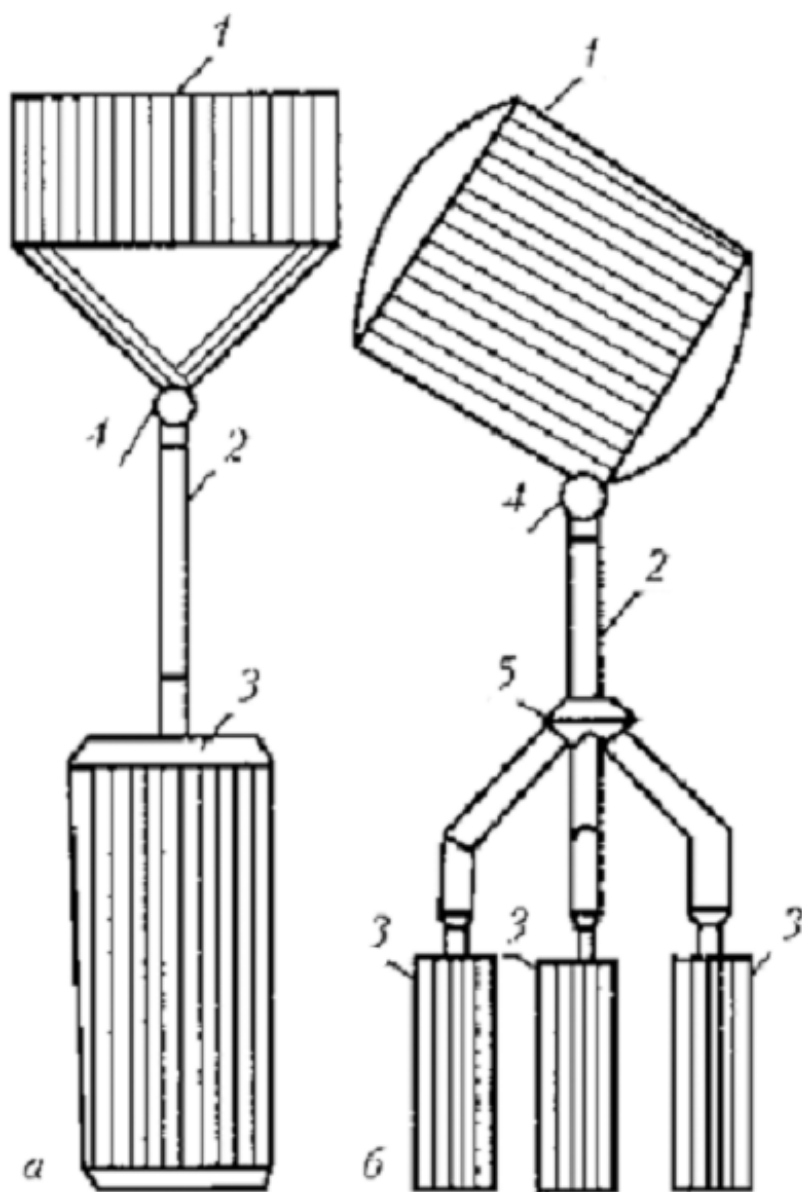


Рис. 12.1. Схемы формующих установок для заполнения пресс-форм по способу свободного литья [15]:

*а – одиночное заполнение; б – групповая заливка 1 – сливная емкость;
2 – сливная система; 3 – пресс-формы; 4 – затвор (клапан);
5 – разделитель*

12.1.1. Истечение композиции из емкостей

При свободном истечении композиции из емкости наблюдается неоднородность ее течения. Причина этого явления заключается, прежде всего, в наличии свободной поверхности у потока, которая значительно осложняет динамику процесса истечения из-за неравномерной скорости движения ее в центральных и периферийных участках. Поток в общем случае можно разбить на три характерные зоны (рис. 12.2): центральную активную зону 1, заторможенную вблизи стенки емкости зону 2 и верхнюю зону 3 [7,15].

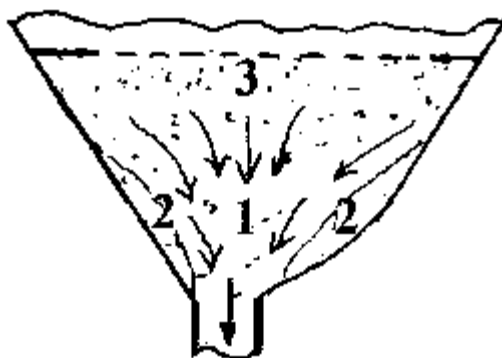


Рис. 12.2. Схема структуры потока модельной топливной массы при сливе из модельного объемного смесителя [7]:

*1 – активная зона потока; 2 – заторможенная зона потока;
3 – выравнивающая зона потока*

В зоне 1 проявляется развитое нисходящее течение жидкости; в зоне 2 сильно ослаблено торможением стенок емкости; в зоне 3 течение в основном направлено от периферийных слоев к центру, благодаря чему свободная поверхность жидкости может выравниваться и в начальный период истечения сохраняет практически плоскую или близкую к ней форму. По мере снижения уровня жидкости и приближения к заторможенной зоне 2 свободная поверхность постепенно прогибается вниз. В центральной части этой поверхности образуется воронка, которая быстро удлиняется и в конечном итоге достигает выходного отверстия емкости и далее может проходить через массопровод в пресс-инструмент, что должно исключаться в практи-

ке формирования изделий. При этом в заторможенной зоне 2 остается некоторое количество сливаемой жидкости объемом V_k , величина которого зависит от условий процесса слива: физических и реологических характеристик истекающей композиции, геометрии смесителя или сливной емкости, гидродинамического напора в сливаемом объеме, начального объема V_0 топливной массы в емкости.

При практическом осуществлении процесса истечения композиции необходимо знать продолжительность времени слива $t_{сл}$, объемный расход Q и объем остающегося материала V_k (несливаемый остаток).

Для решения задач по определению указанных параметров процесса истечения из емкостей обычно используют аналитические методы; численное математическое моделирование; физическое моделирование; экспериментальные методы.

Наилучший результат в моделировании и оптимизации процесса истечения композиций из емкостей достигнут при совместном использовании всех указанных методов решения задачи [15].

Время слива из емкости

$$t_{сл} = \int_{V_0}^{V_k} \frac{dV}{Q(V)}, \quad (12.1)$$

где V , V_0 , V_k – текущий, начальный и конечный объемы материала в емкости соответственно; $Q(V)$ – функция изменения расхода материала в процессе слива в зависимости от объема материала в емкости.

Функция $Q(V)$ меняется на разных стадиях истечения и может быть представлена в виде диаграммы «расход – объем» (рис. 12.3). Применительно к сливу с избыточным давлением Δp кривую $Q(V)$ делят на три стадии. Стадия *I* – начало истечения до образования воронки над сливным отверстием и снятия давления Δp при остаточном объеме $V_{п}$ во избежание прорыва воздуха в сливную магистраль. Стадия *II* – стабилизация течения до образования вторичной воронки при остаточном объеме $V_{в}$. Стадия *III* – конечная стадия слива при объеме материала V_k , остающемся в емкости.

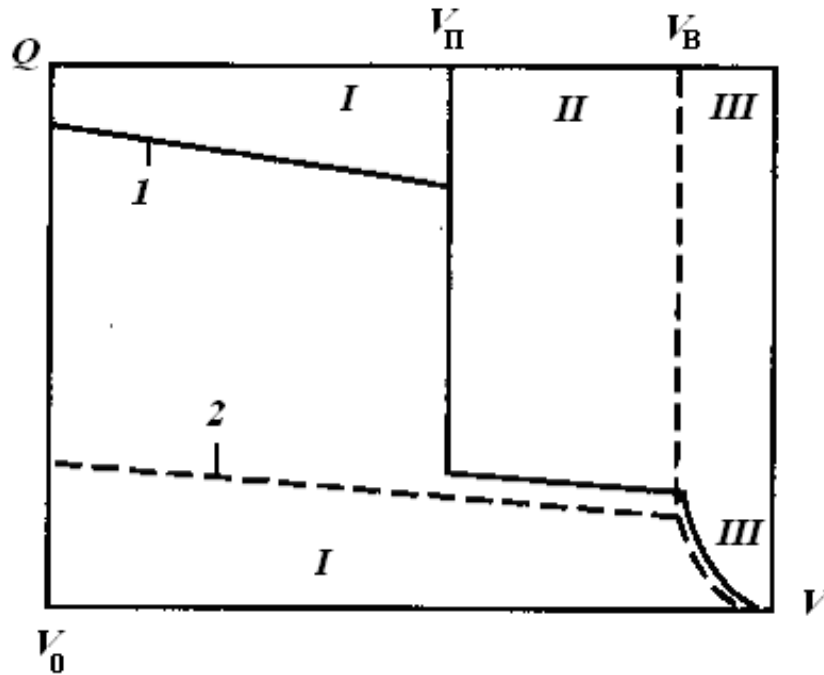


Рис.12.3. Расчетная диаграмма «расход-объем» при сливе композиций с созданием избыточного давления (кривая 1) и без создания давления (кривая 2) [15]:

I, II, III – стадии процесса слива с давлением Δp ; I, III – стадии процесса слива без давления Δp

При сливе без создания избыточного давления кривую $Q(V)$ делят на две стадии (два участка на кривой 2 рис.12.3): стадия *I* – начало истечения с объемом V_0 до образования воронки при объеме V_B ; стадия *III* – конечная стадия процесса слива от объема V_B до объема V_K .

Приближенное значение времени слива

$$t_{\text{сл}} \approx \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N \int_{V_i}^{V_{i+1}} \frac{dV}{Q_i(V)}, \quad (12.2)$$

где N – число стадий процесса слива ($N = 3$ при сливе с давлением Δp , $N = 2$ при сливе без создания избыточного давления); t_i – время истечения композиции на i -й стадии; V_i , V_{i+1} – остаточный объем композиции в емкости в начальный и конечный моменты i -й стадии; $V_{i=1} = V_0$ – начальный объем композиции; $V_{i=N} = V_K$ – конечный объем композиции в емкости.

12.1.2. Параметры течения композиций в массопроводах

При формировании изделий по способу свободного литья и литья под давлением для подачи в пресс-формы приготовленной композиции из объемного смесителя, промежуточных емкостей или иных аппаратов используют массопроводы различной конструкции. Схемы конструкций массопроводов весьма разнообразны и определяются их функциональным назначением. Например, при формировании одиночных изделий свободным литьем предпочтительны вертикальные прямоточные массопроводы, позволяющие максимально использовать силу тяжести при сливе композиций (см. рис.12.1, а).

При групповом формировании изделий применяют разветвленные массопроводы, которые различаются между собой схемами соединения пресс-форм к массопроводу (см. рис.12.1, б).

Под массопроводом понимают совокупность элементов формирующей оснастки от выходного отверстия смесителя или иного аппарата до входного отверстия пресс-формы (пресс-форм). Например, при формировании изделий методом свободного литья массопровод включает патрубок 4 с затвором объемного смесителя, сливную систему 2 и заливочные горловины 3 пресс-форм (см. рис.12.1).

При разработке и оптимизации процесса формирования изделий из СТРТ важна количественная оценка расхода и времени слива, для чего необходимо определить напорно-расходные характеристики массопроводов.

При **последовательном соединении** массопровода с пресс-инструментом (рис. 12.4) полный напор в потоке P без учета местных потерь в затворе и горловине определяется из следующих соотношений:

$$P = \sum_{i=1}^N \Delta p_i ; \quad (12.3)$$

$$\Delta p_i = \left(\frac{Q}{A_i} \right)^n \frac{2L_i}{R_i} k ; \quad (12.4)$$

$$A_i = \frac{\pi R_i^3 n}{3n+1} , \quad (12.5)$$

где L_i , R_i – соответственно длина (высота) и радиус i -го звена массопровода.

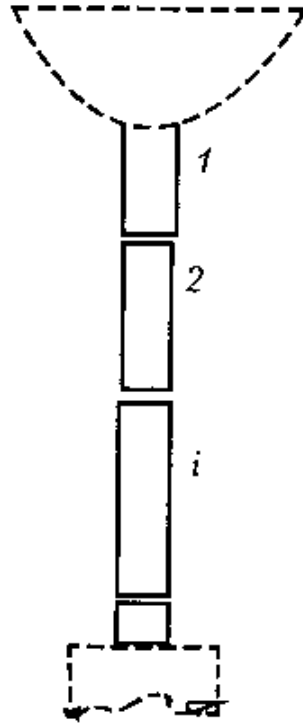


Рис. 12.4. Схема последовательного соединения элементов массопровода [15]

Из совместного решения (12.3) и (12.4) получим следующее выражение для определения объемного расхода в массопроводе:

$$Q = \left(\frac{P}{\sum A_i^{-n} \frac{2L_i}{R_i} k} \right)^{1/n}. \quad (12.6)$$

Для **разветвленной схемы** массопровода (рис. 12.5) используют следующие соотношения:

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i; \quad (12.7)$$

$$Q_i = A_i \left(\frac{PR_i}{2kL_i} \right)^{1/n}; \quad (12.8)$$

$$P = \Delta p + \rho g l + \rho g H + \Delta p_{\text{сн}}, \quad (12.9)$$

где l — длина трубопровода от смесителя до разветвления; H — высота топливной массы в смесителе; $\Delta p_{\text{сн}}$ — местные реодинамические сопротивления в клапане смесителя и горловине пресс-формы.

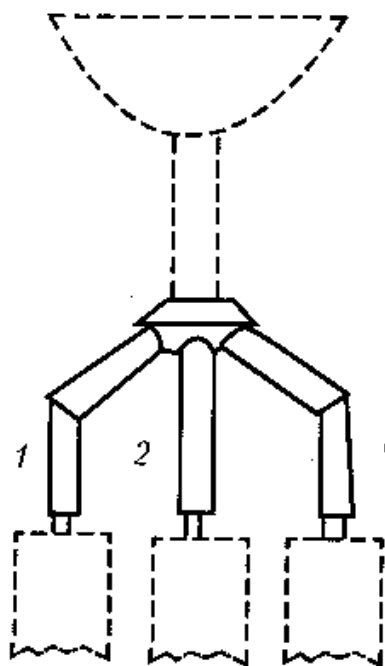


Рис. 12.5. Схема параллельного соединения элементов массопровода [15]

В некоторых конструкциях формующей оснастки содержатся элементы с проходными каналами или ответвлениями, близкими к щелевой форме. В случае, когда поперечная длина щели намного превышает ее ширину (на практике $W/H \geq 4-5$), можно использовать расчетные формулы, полученные для течения вязких жидкостей в зазоре между двумя бесконечно длинными плоскостями. Тогда для определения объемного расхода топливной массы по степенному реологическому закону течения можно использовать следующее выражение:

$$Q = \frac{2nW}{1+2n} \left(\frac{P}{Lk} \right)^{1/n} \left(\frac{H}{2} \right)^{1/n+2}. \quad (12.10)$$

12.1.3. Заполнение пресс-форм и корпусов двигателей

Способом свободного литья заполняют пресс-формы или корпус двигателя сверху свободно падающей струей или стекающим по поверхности иглы слоем топливной композиции.

Заполнение свободно падающей струей. Относительно простое осесимметричное течение реализуется при центральной заливке пресс-формы или корпуса двигателя, не содержа-

щих иглу, свободно падающей струей. Для этого случая на основной стадии заполнения пресс-формы поверхности раздела между порциями внутри заполняемого объема в зоне падения струи имеют форму полусфер или сегментов сферы. По мере увеличения размеров поверхностей раздела при последующей заливке композиции они во все большей степени деформируются в результате влияния твердых стенок. Погружение композиции из зоны контакта струи со свободной поверхностью внутри заполненного объема создает в этой зоне нисходящее течение в центре и восходящее у стенок.

Заполнение стекающей по игле струей. Осесимметричное ползущее течение осуществляется также при центральной заливке пресс-формы по поверхности иглы, которая консольно крепится ко дну пресс-формы (рис. 12.6).

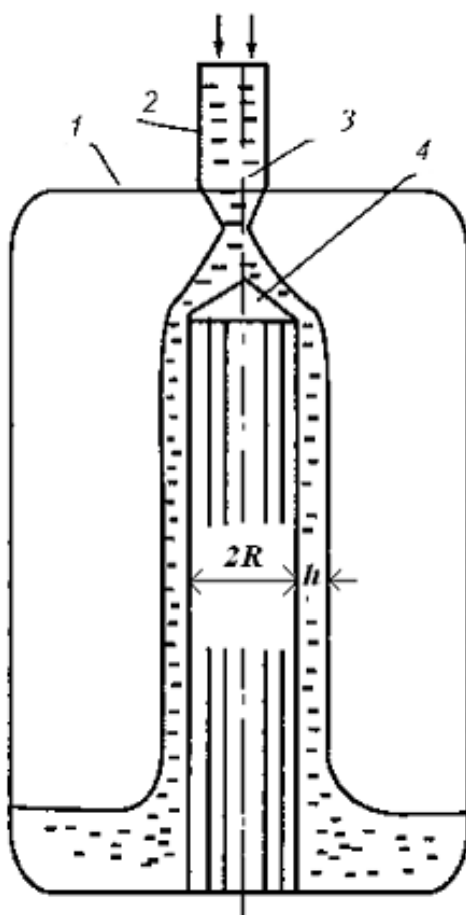


Рис.12.6. Схема течения композиции в пресс-форме с консольно закрепленной иглой [15]:

1, 2 – корпус и горловина пресс-формы; 3 – поток; 4 – игла

Заполнение пресс-форм в рассматриваемом случае сопровождается стеканием по игле пристенного слоя с двумя переходными участками сверху и снизу и стабилизированным течением в центре. Для приближенных оценок параметров движения слоя вязкой жидкости могут быть использованы соотношения зависимости толщины стекающего слоя h от объемного расхода Q и реологических параметров степенной модели вязкой жидкости, стекающей по плоской вертикальной стенке шириной, равной периметру круглой иглы радиуса R , следующего вида:

$$h = \left[\frac{Q}{2\pi R} \left(\frac{k}{\rho g} \right)^{1/n} \frac{(1+2n)}{n} \right]^{\frac{n}{(1+2n)}}, \quad (12.11)$$

При заполнении изделий более сложной геометрией твердых стенок, например пресс-формы с корпусом в виде «кокона» и с центральной иглой, содержащей зонтиковый выступ, реализуется пространственный вид течения топливной композиции [15].

Схема потока на начальной и основной стадиях процесса заполнения пресс-формы показана на рис. 12.7. В потоке выделены три участка по видам течения:

- в малом коаксиальном зазоре входного узла пресс-формы;
- поверхностное течение по цилиндрической части иглы;
- в зоне зонтичного выступа на начальной стадии заливки.

Наиболее ответственным является заполнение топливом пространства под зонтичным выступом иглы. Нельзя допускать зависания первой порции топлива под этим выступом и образования свободного объема, не заполненного топливом. Для этого регулируют (снижают) расход топливной массы до допустимой величины, по возможности корректируют реологические характеристики топливной консистенции, обеспечивают нужную глубину разрежения в системе.

На рис. 12.8 показана фотография дефектного изделия, на поверхности которого видны полосы выхода воздуха при недостаточном вакуумировании пресс-формы в процессе заливки топливной массы.

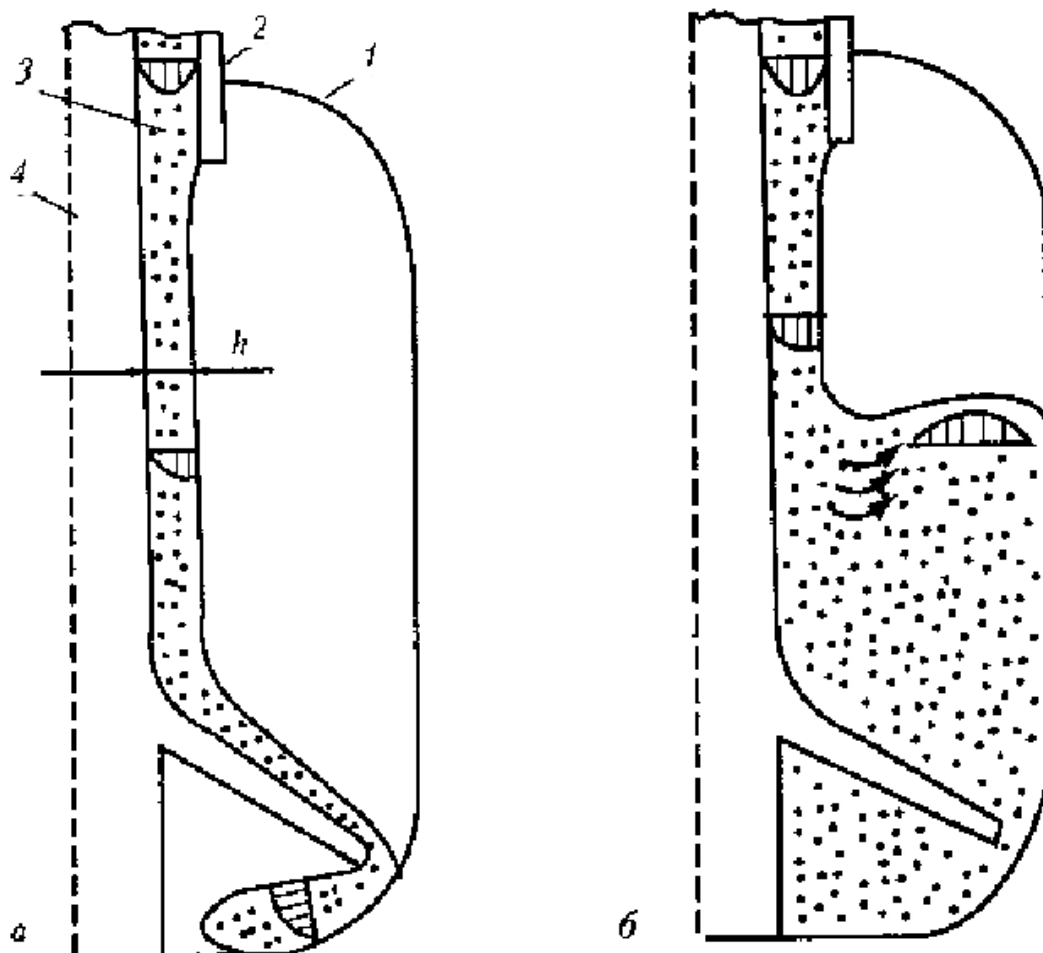


Рис.12.7. Схемы заполнения пресс-формы «кокон» на начальной (а) и основной (б) стадиях [15]:

1,2 – корпус и горловина пресс-формы; 3 – поток; 4 – игла

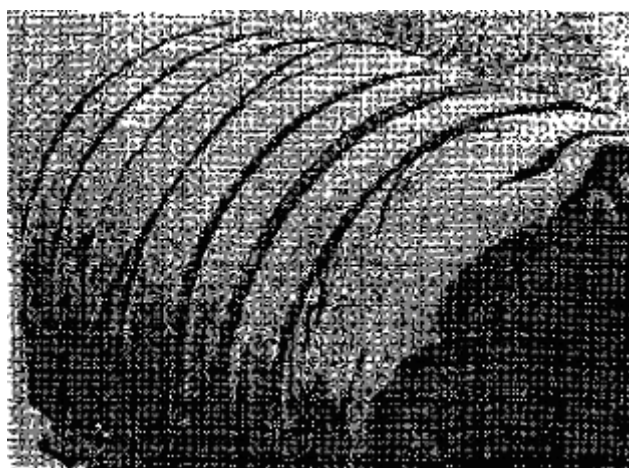


Рис.12.8. Фрагмент дефектного изделия, на поверхности которого видны полосы от выхода воздуха при недостаточном вакуумировании пресс-формы при заливке топливной массы

12.2. Формование изделий методом литья под небольшим давлением

При формовании изделий литьем под небольшим давлением пресс-форму 3 с иглой 5 и выступами 6 заполняют снизу вверх при подаче в нее композиции через массопровод 2 из цилиндрической емкости 1, из которой композиция принудительно вытесняется поршнем 4 (рис. 12.9, а). При групповом формовании одновременно заполняют две или более пресс-форм через разветвленный массопровод (рис. 12.9, б). Поршень приводится в движение либо гидроприводом, либо давлением сжатого газа в емкости 1.

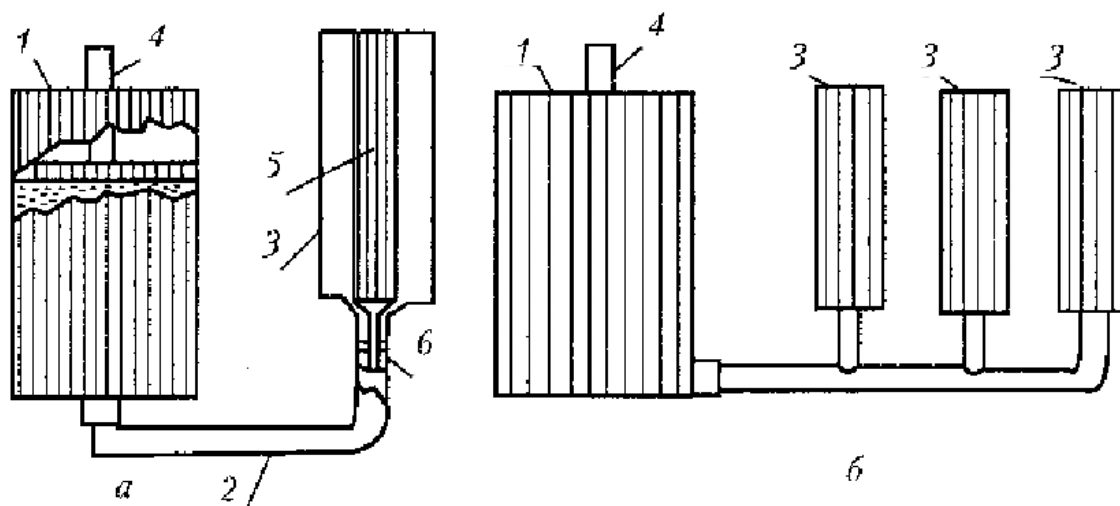


Рис. 12.9. Схемы формования изделий по способу литья под небольшим давлением [15]:

а — одиночное заполнение; б — групповое заполнение
1 — нагнетающий аппарат; 2 — массопровод; 3 — пресс-формы;
4 — поршень; 5 — игла; 6 — перья иглы (выступы иглы)

Возможно также формование изделий по комбинированной схеме, когда пресс-формы заполняют заливкой сверху, как при свободном литье. Принудительная подача композиции в пресс-формы через массопровод 2 происходит под небольшим давлением за счет ее выдавливания из цилиндрической емкости 1 поршнем 4 (рис. 12.10).

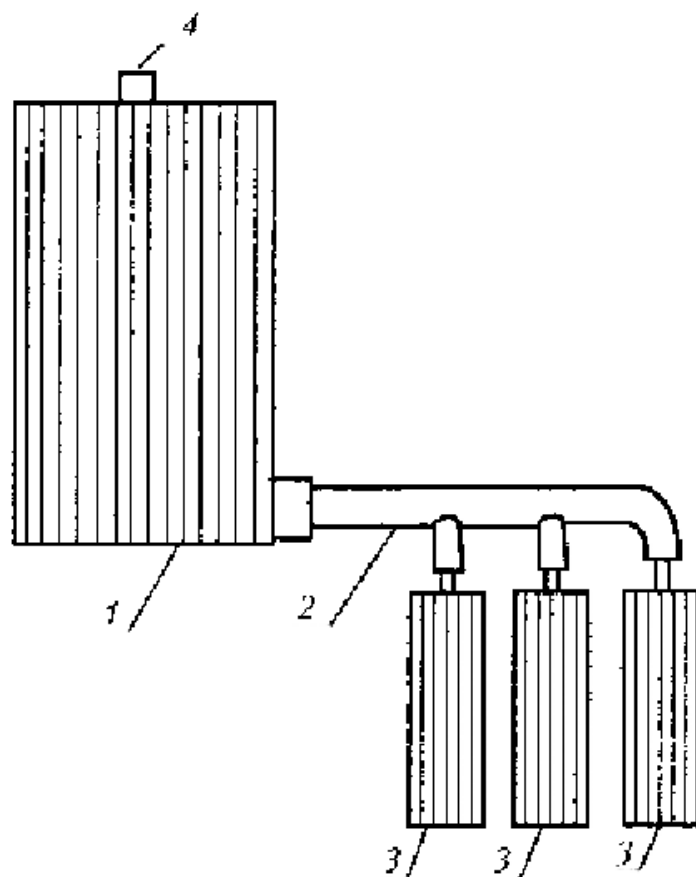


Рис. 12.10. Комбинированная схема формования изделий [15]:
 1 – нагнетающий аппарат; 2 – массопровод; 3 – пресс-формы;
 4 – поршень

Время выдавливания композиции t_B из емкости по способу литья под небольшим давлением (см. рис. 12.9, а)

$$t_B = \pi R^2 \int_{H_0}^{H_k} \frac{dH}{Q(H)}, \quad (12.12)$$

где R – радиус поршня; H_0 , H_k , H – соответственно начальная, конечная и текущая высота слоя композиции в емкости в процессе формования.

Для приближенного вычисления времени t_B интеграл (12.12) заменяют следующими выражениями:

$$t_B \approx \pi R^2 H_{cp} Q_{cp}; \quad Q_{cp} = A \left(\frac{p_{cp} R}{2 H_{cp} k} \right)^{1/n}; \quad A = \frac{\pi R^3 n}{3n+1}; \quad p_{cp} = p_{уд} + \rho g H_{cp}, \quad (12.13)$$

где $p_{уд} = F/(\pi R^2)$, F – усилие, действующее на поршень; $H_{cp} = (H_0 + H_k)/2$; k , n , ρ – соответственно показатель консистенции, индекс течения и плотность композиции.

Общая закономерность заполнения изделий способом литья под давлением по схеме «снизу-вверх» заключается в том, что порции топлива, которые поступают в пресс-форму в первую очередь, располагаются в периферийных слоях изделия, примыкающих к стенке иглы и корпуса. В процессе заполнения пресс-формы последующие порции внедряются в предыдущие и оттесняют их вверх и в стороны, по направлению к стенкам иглы и корпуса. При этом развитое течение с профилем свободной поверхности (рис.12.11) проявляется практически во всем объеме топливной композиции, находящейся в пресс-форме на протяжении всего периода ее заполнения.

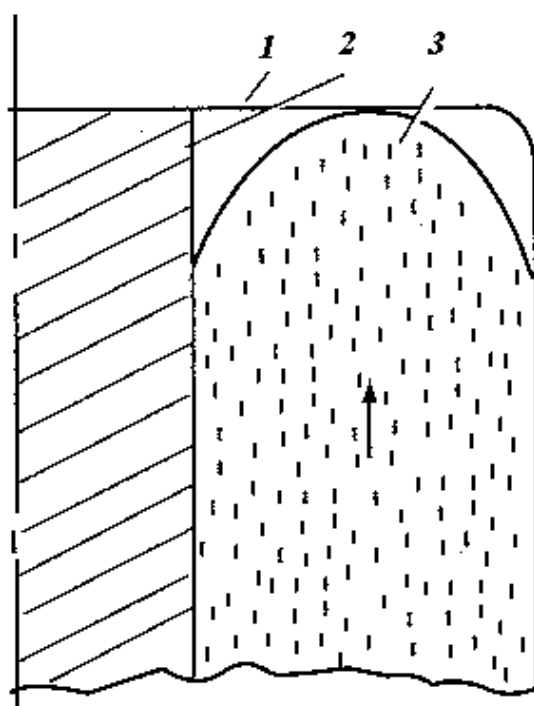


Рис. 12.11. Схема потока при заполнении пресс-формы «снизу-вверх» [15]:

1 – корпус; 2 – игла; 3 – поток композиции

В заключительной стадии заполнения пресс-формы течение топливной массы становится нестационарным из-за влияния на него верхнего торца корпуса, что приводит к перестройке профиля свободной поверхности и реодинамических полей внутри потока. При этом возможно образование дефектов в изделиях, например в случае появления пустот в угловых зонах у верхнего торца пресс-формы.

Следует отметить, что при длительном формировании крупногабаритных изделий слои топлива, прилегающие к стенкам пресс-формы и иглы, охлаждаются, в то время как в центральных слоях топлива температура длительное время сохраняет первоначальную величину. Разница в значениях температуры у стенки T_w и в центре потока T_0 может достигать $\Delta T = T_0 - T_w \approx \approx 25\text{--}30^\circ\text{C}$, вследствие чего изменяются и реологические свойства топлива. В результате профиль потока становится более выпуклым, что объясняется увеличением касательных напряжений в топливной массе у твердых стенок.

Для оптимизации процессов формирования изделий (свободным литьем, литьем под давлением) возникают проблемы, связанные с реологическими свойствами топливных масс, теплообменными процессами, гидродинамикой и реодинамикой потоков в различном оборудовании, возможностью протекания процессов отверждения и с другими.

По окончании формирования изделия пресс-форма или корпус двигателя отсоединяются от смесителя или аппарата заполнения топливной массой и транспортируются на технологическую фазу отверждения и охлаждения изделия.

При изготовлении крупногабаритных зарядов, масса которых превышает единовременную загрузку смесителя, используют контейнерный способ с разделением фазы смешения и формирования. Роль смесителя и одновременно контейнера могут выполнять планетарные смесители с мешалками (см. рис. 11.1) и объемные смесители (см. рис. 11.2) при установке их на железнодорожной платформе или автотранспорте, с помощью которых смесители перемещают в здание заливки (формования изделий).

Топливную массу сливают последовательно из нескольких смесителей по специальному рабочему графику в пресс-форму или корпус двигателя, которые расположены в специально оборудованных шахтах. Там же проводят процесс отверждения и охлаждения изделий.

Контрольные вопросы

1. Каким образом осуществляется заполнение пресс-формы или корпуса двигателя при свободной заливке топливной массы?
2. Дайте краткую характеристику течению топливной массы в сливной емкости.
3. Как определить время заполнения пресс-формы при свободной заливке топливной массы?
4. Назовите характерные особенности процесса заливки топливной массы в пресс-инструмент с центральной иглой.
5. В чем отличие заполнения пресс-форм топливной массой с помощью последовательного и разветвленного массопроводов?
6. Каким образом осуществляется заполнение пресс-формы или корпуса двигателя при заливке топливной массы под давлением?
7. Определите время заполнения пресс-формы или корпуса двигателя топливной массой при литье под давлением.

Глава 13. ЗАВЕРШАЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТРТ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ [2, 7, 10, 21–26]

13.1. Отверждение и охлаждение изделий из СТРТ

На стадии отверждения (полимеризации) топливной массы завершается формирование структуры и физико-механических характеристик (ФМХ) 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.

Процессы полимеризации сопровождаются выделением теплоты и протекают самопроизвольно с уменьшением энергии Гиббса в системе.

При достаточно высоких температурах вместо полимеризации термодинамически возможен обратный процесс *деструкции* (разложения) системы. Эта температура тем ниже, чем меньше величина теплоты полимеризации.

При полимеризации в массе (полимеризация в блоке) характерна высокая вязкость реакционной среды при больших степенях превращения, вследствие чего затрудняется тепло- и массообмен. Поэтому скорость процесса регулируют таким образом, чтобы избежать чрезмерного разогрева в центре реакционной массы.

Продолжительность технологической фазы отверждения составляет 70–80 % от всего времени изготовления зарядов и может достигать от нескольких до 25 суток и более. Это самая длительная операция производственного цикла от изготовления топлива до создания ракетного заряда.

Для каждого конкретного состава топливной массы определяют оптимальные условия изменения ее температуры от времени проведения процесса полимеризации, чтобы получить изделие с необходимой полнотой отверждения топливной массы и однообразием ФМХ по всему объему заряда. Для решения такой задачи необходимо знать:

- вид и количество отверждающих добавок в сочетании с используемым связующим и условиями отверждения;
- механизм химических реакций и физико-химических процессов, протекающих при отверждении топливной массы;
- свойства отверждающих добавок, чтобы обеспечить малую активность топлива при температурах его получения и формования заряда, минимальный тепловой эффект, отсутствие газообразных и других продуктов в процессе отверждения.

В кинетическом отношении процессы полимеризации в большинстве случаев характеризуются как реакции, обладающие цепным механизмом. Степень полимеризации конечного продукта в таком случае зависит от длины реакционной цепи и, следовательно, от соотношения скоростей возбуждения реакционных цепей и их обрыва. Течение реакции можно регулировать, изменяя условия проведения процесса.

К компонентам системы отверждения относятся собственно отвердитель, инициатор и регуляторы процесса полимеризации (ускорители и замедлители преждевременного отверждения).

Одни *инициаторы* возбуждают образование из молекул мономеров радикалов со свободной валентностью. Тогда последующая полимеризация происходит через образование новых радикалов. Другие способствуют течению процесса через образование не радикалов, а ионов разного знака. В соответствии с этим различают *радикальную* и *ионную* полимеризацию; последнюю подразделяют на *катионную* и *анионную*.

В радикальных реакциях полимеризации применяют органические и неорганические перекиси, азосоединения, персульфаты, пербораты и другие.

Вместе с инициаторами в систему вводят также *ускорители* процесса полимеризации, которые активируют действие самих инициаторов (возбудителей) процесса. Это дает возможность повысить скорость полимеризации и проводить процесс при более низкой температуре без снижения его скорости. Кроме того, уменьшение необходимого количества инициатора нередко приводит к повышению термостойкости конечного продукта.

В других случаях процесс полимеризации осуществляют в форме реакции, протекающей по ионному механизму. К катионным катализаторам относят такие вещества, как BF_3 , AlCl_3 и другие, которые являются электрофильными и способными при взаимодействии с другими молекулами оттягивать от них электроны.

К анионной относят процессы полимеризации винильных соединений под действием амидных ионов или растворов натрия в жидком аммиаке и другие.

Наряду с инициаторами процесса полимеризации используют *регуляторы* процесса, влияющие на длину получаемых цепей «сшивки», а также вещества, которые не ускоряют, а замедляют полимеризацию, – *ингибиторы процесса*.

Ингибиторы замедляют полимеризацию при температурах переработки топливной композиции, сохраняя необходимые литьевые качества топлива, что особенно важно при относительно длительном заполнении пресс-формы или корпуса двигателя. Такого замедления процесса трудно добиться простым уменьшением количества отверждающих добавок в топливе, поскольку при этом увеличивается общая продолжительность полимеризации, и ухудшаются физико-механические характеристики изделия [7].

Рассмотрим некоторые примеры искусственного отверждения полимерных систем. Отверждение ненасыщенных эластомеров – вулканизацию часто проводят с использованием серы. При повышенных температурах может происходить разрыв циклических молекул серы с образованием свободных радикалов, которые взаимодействуют с линейными макромолекулами каучука с образованием твердой эластичной трехмерной сетки.

Для ускорения процессов вулканизации и снижения температуры при использовании серных систем отверждения применяют специальные вещества – ускорители и активаторы. Типичным органическим ускорителем является тиурам (тиурам сульфиды). В качестве активаторов процессов вулканизации используют оксиды металлов (ZnO , MgO , CaO , CdO), органические соединения (например этаноламины, дибутиламмоний-олеат, тиомочевина). Эффективность оксидов металлов возрастает при их совместном применении с высшими жирными кислотами, например стеариновой или олеиновой.

Для отверждения некоторых сополимеров и олигомеров каучуков используют полиэпоксидные смолы. Они представляют собой вязкие массы, очень липкие в расплаве или в растворе, с высокой адгезией к большинству материалов; их функциональные эпоксидные группы вступают в реакцию некоторых веществ, что приводит к повышению их молярной массы и образованию сшитой структуры.

Полисульфидные каучуки, известные под названием «тиоколы», подвергают вулканизации с помощью оксидов металлов (оксид цинка) и окисляющих агентов.

Полимеризацию полимерных нитроэфиров осуществляют с помощью *эпихлоргидрина*, который взаимодействует с оксигруппами.

В качестве отверждающих добавок для полиуретановых каучуков используют *диизоцианаты*.

Таким образом, отверждающая система может быть многокомпонентной; в зависимости от вида полимера содержать серу, тиурам, эпоксидные смолы, оксиды металлов или другие вещества.

Реакции отверждения смесевых твердых топлив протекают в тонких слоях полимера, находящихся в тесном контакте с поверхностью частиц наполнителя. Наличие развитой поверхности частиц может влиять на скорость процессов отверждения. Поскольку отверждающая система представляет собой смесь компонентов, то возможна избирательная сорбция какого-либо из них на поверхности частиц, что будет способствовать повышению жесткости вулканизатора вблизи раздела границы

фаз и образованию более редкой сетки в объеме топлива. На отверждение топливной массы также оказывает влияние природа наполнителей и степень их дисперсности. Все это необходимо учитывать при выборе системы отверждения и технологических параметров для каждой конкретной композиции.

За показатель завершенности процесса отверждения обычно принимают *степень полимеризации* β как отношение изменения какого-либо физико-химического параметра в любой момент времени t . Например, если меняющийся во времени модуль упругости $E(t)$ отнести к конечному значению этого параметра E_{\max} , то $\beta = E(t) / E_{\max}$

Сложность и многообразие процессов отверждения связаны с необходимостью использования различных методов их изучения и контроля:

- *химический анализ* изменения реакционных групп в связующем;
- *реодинамические* изменения вязкости во времени;
- *калометрический метод* замера теплового эффекта в процессе отверждения;
- *ультразвуковой метод* замера скорости распространения упругих волн в изделии по мере его отверждения;
- определение физико-механических характеристик *на образцах* – «спутниках», находящихся в аналогичных условиях процесса отверждения, как и основное изделие и другие [7].

Отверждение изделий проводят в специальных кабинах или шахтах в горизонтальном или вертикальном положении. Шахта представляют собой бетонированный колодец круглого сечения, в которой регулируют и контролируют температуру воздуха при термостатировании заполненных топливом пресс-форм для вкладных зарядов и корпусов двигателей для скрепленных зарядов. Иглы имеют полости для термостатирования водой с нужной температурой. При отверждении также контролируют давление топливной массы в пресс-форме или корпусе двигателя.

По окончании процесса отверждения изделия охлаждают в тех же кабинах или шахтах подачей воздуха определенной температуры. В крупногабаритных изделиях охлаждают и иглу

за счет подачи воды. Режимы охлаждения должны быть как можно более короткими и исключать возникновение опасных напряжений и деформаций в системе при ускорении этого процесса, которые могут приводить к появлению дефектов в заряде. Обычно процесс охлаждения крупных изделий продолжается в течение нескольких суток [7,20].

13.2. Формование изделий методом проходного прессования

Метод проходного прессования используют для изготовления малогабаритных изделий из топливных масс на основе ПХА и термопластичных полимерных материалов (например, полистирола, поливинилбутираля и других) по непрерывной схеме, близкой к производству баллистических порохов.

По этой технологии компоненты топливной массы смешиваются в механических лопастных смесителях с нижним выгрузным шнеком. Затем порошкообразная масса влажностью 5% поступает на непрерывно действующую установку вальцевания и при температуре 80–85 °С превращается в монолитное полотно, из которого формуются таблетки топлива. В дальнейшем таблетки шнековым транспортером передаются в бункер шнек-пресса, где происходит вакуумирование топливной массы. С помощью формующего или раструбного пресс-инструмента шнековой установки из топливной массы изготавливают канальные и бесканальные шашки-заготовки диаметром от 60 до 250 мм, которые режут пневматическим ножом на требуемую длину.

Принципиальная схема изготовления изделий методом проходного прессования (рис. 13.1) включает в себя следующие виды оборудования: механический смеситель периодического действия 1; шнековый транспортер топливной массы 2; установку вальцевания непрерывного действия 3; шнековый транспортер топливной таблетки 4; бункер с вакуумным затвором 5; шнековый пресс 6; раструбный пресс-инструмент 7; пневматический нож 8 для резки шашки на нужную длину.

Метод проходного прессования имеет ограниченное применение.

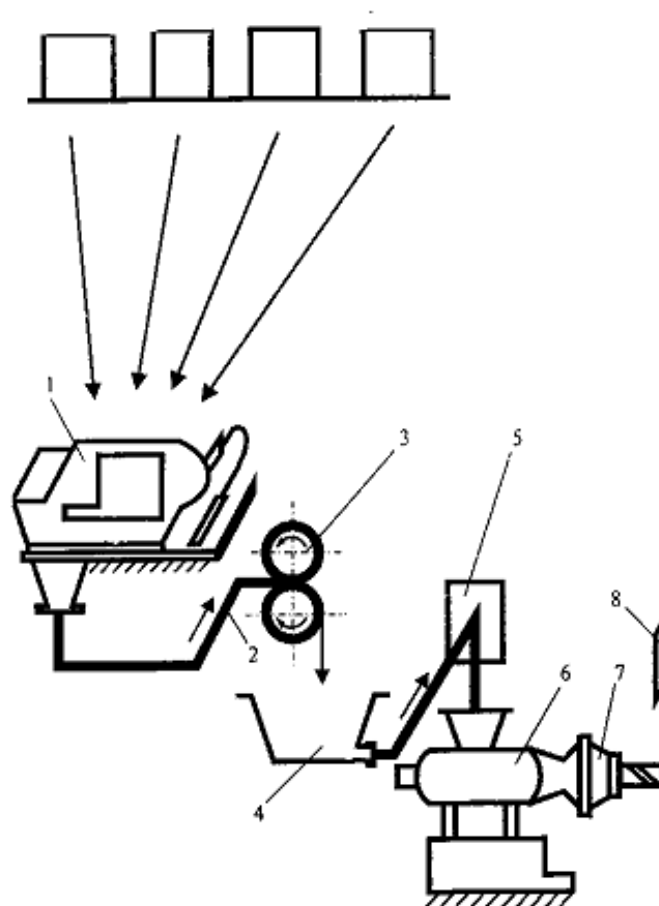


Рис. 13.1. Принципиальная схема изготовления изделий из СТРТ методом проходного прессования [10]:

1 – смеситель; 2,4 – шнековые транспортеры; 3 – вальцевая установка; 5 – бункер; 6 – шнек-пресс; 7 – пресс-инструмент; 8 – нож

К завершающим операциям при производстве изделий из СТРТ относят:

- распрессовку;
- контроль качества изделий;
- подготовку вкладных изделий к бронированию;
- бронирование изделий.

На стадии распрессовки обычно выполняют следующие операции [7]:

- разборку узлов соединений технологических крышек с пресс-формой или корпусом двигателя;
- отрыв и снятие крышек;
- извлечение иглы и другой технологической оснастки из пресс-формы и корпуса двигателя;

- вырубку «прибыли» – выступов на торце заряда, оставшихся от входных штуцеров массопровода и т.п.;
- извлечение заряда из пресс-формы, транспортировка и другие операции.

Усилие, необходимое для отрыва технологической оснастки от заряда (снятие крышек), прежде всего зависит от величины удельной адгезионной прочности при отрыве $\sigma_{ад}$ между ними и величины взаимной контактной поверхности S и его приближенно определяют как $P = \sigma_{ад}S$. Напряжение при извлечении иглы из заряда и изделия из пресс-формы приближенно находят как $\sigma_{сд} = \tau_{ад}$, где $\tau_{ад}$ – удельная адгезионная прочность при сдвиге. Следует отметить, что величины $\sigma_{ад}$ и $\tau_{ад}$ зависят от скорости отрыва и температуры адгезионного соединения.

Контактирующие с топливом элементы оснастки покрывают антиадгезионным слоем для уменьшения адгезионной прочности на отрыв и сдвиг.

Такие завершающие операции, как контроль качества вкладных зарядов из СТРТ, подготовка их к бронированию и сам процесс бронирования осуществляют практически такими же способами, как и для ракетных зарядов из БТРТ. При этом должны быть учтены специфические особенности СТРТ:

- сравнительно низкая температура воспламенения и высокая чувствительность к тепловым импульсам;
- низкая теплопроводность (в 200–300 раз меньше металлов) и высокая теплоемкость (примерно в 3 раза больше стали);
- высокая чувствительность к удару и трению;
- сравнительно невысокие прочностные и деформационные свойства;
- большое количество окислителя в составе смесового твердого топлива, что вызывает коррозию используемого оборудования.

13.3. Физико-механические и теплофизические свойства изделий из баллиститных и смесевых твердых ракетных топлив

13.3.1. Механические свойства топлив

Механические характеристики изделий из СТРТ и БТРТ в большинстве случаев получены при испытании модельных образцов по химическому составу и структуре, соответствующих реальным натурным изделиям.

Для общей инженерной оценки свойств твердого ракетного топлива, позволяющей в полном объеме провести деформационно-прочностные конструктивные расчеты ракетного заряда, необходимы:

- механические испытания на сжатие-растяжение при различных температурах, скоростях деформирования, гидростатических давлениях;
- определение долговременной прочности при различных температурах;
- определение ползучести при различных температурах;
- механические испытания при сложно-напряженном состоянии;
- определение динамических характеристик и другие.

К основным механическим свойствам ТРТ относят:

- модуль упругости растяжения из диаграммы «напряжение растяжения -деформация» при деформации образца, равной 10% ($E_{10\%}$);
- модуль упругости растяжения при деформации, равной 2% ($E_{2\%}$);
- модуль упругости сжатия $E_T = \sigma_T / \varepsilon_T$, где σ_T , ε_T – напряжение и относительная деформация, соответствующие началу текучести из диаграммы «напряжение сжатия – деформация»;
- σ_{Π} , ε_{Π} – соответственно напряжение и относительная деформация разрушения образца при сжатии.

Большое влияние на механические свойства ТРТ смесового и баллистического топлива оказывает скорость деформирования. С ее увеличением для вкладных изделий наблюдаются повышение прочности, модуля упругости и уменьшение предельных значений относительной деформации, а для некоторых типов изделий увеличиваются все механические параметры (прочности, модуля упругости и относительной деформации).

При уменьшении температуры испытания указанные механические свойства образцов топлив увеличивают свои значения.

Существенное влияние на механические свойства ТРТ оказывает гидростатическое давление, возможное в условиях работы ракетного двигателя, особенно для СТРТ. До определенного значения давления, выше атмосферного, происходит уплотнение структуры наполнителя и связующего, что приводит к увеличению прочностных и упругих характеристик ТРТ. Деформационные характеристики зависят от структуры связующего компонента, поэтому в некоторых случаях деформационная способность топлива увеличивается или остается неизменной.

Динамические характеристики в пределах работы ракетного двигателя в основном не влияют на механические свойства ТРТ.

Основные механические свойства СТРТ и БТРТ при $T = 20^{\circ}\text{C}$ приведены в табл. 13.1 [21].

Таблица 13.1

Основные механические свойства ТРТ при $T = 20^{\circ}\text{C}$ [21]

Метод испытания	Характеристика	СТРТ		БТРТ	
		миним.	максим.	миним.	максим.
Растяжение	$\sigma_{\text{п}}$, МПа	0,8/0,4*	5/1,6*	1,8	16
	$\varepsilon_{\text{п}}$, %	3/22*	31/54*	4	45
	$E_{10\%}$, МПа	1,5*	6,5*	-	-
	$E_{2\%}$, МПа	7,0/1,5*	90/6,5*	1,6	1580
Растяжение	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	3,0	20	4,0	63
	$\sigma_{\text{п}}$, МПа	3,4	48	7,0	20
	$\varepsilon_{\text{п}}$, %	25	50	10	50
	$E_{\text{т}}$, МПа	270	1600	55,0	1290
Примечание: * – прочно скрепленные изделия с корпусом двигателя					

13.3.2. Теплофизические характеристики топлив

К основным теплофизическим характеристикам изделий из СТРТ и БТРТ относят: удельную теплоемкость c , Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности λ , Дж/(м·с·К), коэффициент температуропроводности a , м²/с, температурный коэффициент линейного расширения α_T , К⁻¹.

Значения теплофизических характеристик ракетных топлив при температуре 293 К приведены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Теплофизические характеристики твердых топлив (ТФХ) при 293 К [22]

ТФХ	БТРТ		СТРТ	
	безметалл- ные	металл- содержащие	безметалл- ные	металлсо- держащие
λ , Вт/(м·К)	0,2 – 0,3	0,2 – 0,3	0,2 – 0,4	0,4 – 0,7
$a \cdot 10^7$, м ² /с	0,8 – 1,3	1,5 – 1,6	1,3 – 1,7	1,9 – 3,1
c , кДж/(кг·К)	1,3 – 1,9	0,9 – 1,4	1,2 – 1,6	1,0 – 1,4
$\alpha_T \cdot 10^4$, К ⁻¹	1,2 – 1,5	0,9 – 1,2	1,2 – 1,5	0,6 – 1,2

Как показывают данные табл. 13.2, значения ТФХ твердых ракетных топлив находятся в достаточно узком диапазоне. Баллиститные и смесевые твердые топлива характеризуются сравнительно большими значениями коэффициентов линейного расширения, величина которых примерно на порядок больше, чем у металлов.

Дополнительные сведения о механических и теплофизических свойствах твердых топлив рассмотрены в [21-22].

13.4. Области применения изделий из СТРТ

В качестве примера рассмотрим следующие области применения изделий СТРТ в средствах вооружений.

1. Зенитно-ракетный комплекс «Триумф С-400» [23], (рис. 13.2).



Рис.13.2. Зенитно-ракетный комплекс «Триумф С-400» [23]

2. Ракетный комплекс «Искандер» [23], (рис. 13.3)



Рис.13.3. Ракетный комплекс «Искандер» [23]

3. Ракета РТ-2ПМ «Тополь» [23,26], (рис. 13.4)

Техническая характеристика

Трехступенчатая, твердотопливная	
Максимальная дальность полета	10 500 км;
Стартовая масса	45,1 т;
Длина, м	21,5
Максимальный диаметр, м	1,8
Масса полезной нагрузки, кг	1000
Головная часть (ГЧ) моноблочная, ядерная	



Рис.13.4. Ракетный комплекс «Тополь» [23]

4. Ракетный комплекс «Булава» [23], (рис. 13.5 и 13.6).



Рис.13.5. Старт ракеты «Булава» из подводного положения [23]



Рис.13.6. Совместный старт ракет «Булава» из подводного положения [23]

Контрольные вопросы

1. Для чего нужно проводить технологическую операцию отверждения в производстве изделий из СТРТ?
2. Какие основные физико-химические процессы происходят при отверждении топливных масс?
3. Какую роль при отверждении изделий из СТРТ выполняют добавки: инициаторы, возбудители, ингибиторы?
4. Назовите характерные признаки производства изделий из СТРТ методом проходного прессования.
5. Дайте краткую характеристику завершающим операциям в производстве изделий из СТРТ.
6. Какие механические характеристики изделий из СТРТ Вы знаете? Дайте им оценку.
7. Какие теплофизические характеристики изделий из СТРТ Вы знаете? Дайте им оценку.

Глава 14. ГИБРИДНЫЕ, ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЕ И ГИДРОРЕАГИРУЮЩИЕ ТОПЛИВА [2, 3, 7, 27–28]

14.1. Общие сведения о гибридных ракетных топливах

В *гибридных ракетных топливах* (ГРТ) используют компоненты различного агрегатного состояния – жидкие и твердые. Эти топлива предназначены для *гибридных ракетных двигателей* (ГРД).

Топлива, содержащие жидкий окислитель и твердое горючее, получили название *гибридные ракетные топлива прямой схемы*.

Топлива, содержащие жидкое горючее и твердый окислитель, получили название *гибридные ракетные топлива обратной схемы*.

Топлива, в которых твердое горючее или окислитель представляют собой смесь окислителя и горючего с преобладанием того или другого вещества, называют *гибридные ракетные топлива смешанной схемы*.

Широкое применение нашла прямая схема ГРД, которая обеспечивает наибольший удельный импульс (рис. 14.1).

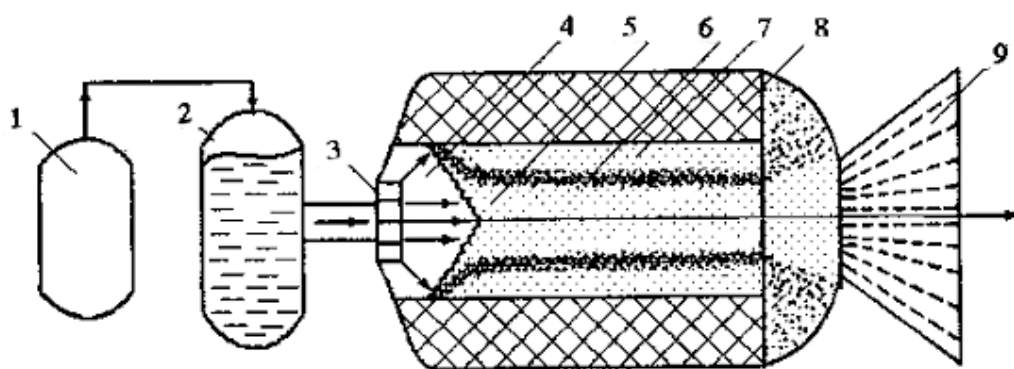


Рис. 14.1. Схема гибридного (комбинированного)
ракетного двигателя [3]:

1 – баллон со сжиженным газом; 2 – бак с жидким окислителем;
3 – форсунки; 4 – холодный окислитель; 5 – зона смешения окислителя и
продуктов сгорания; 6 – зона активного горения; 7 – зона смешения
продуктов газификации и продуктов сгорания; 8 – заряд твердого топ-
лива (горючего); 9 – реактивное сопло

Первая в мире ракета на гибридном топливе (отвержденный бензин и жидкий кислород) была запущена в СССР. Она создана под руководством С.П. Королева по проекту М.К. Тихонравова [3].

В последние десятилетия военным задачам соответствовали РДТТ, отличающиеся длительным сроком хранения и готовностью к быстрому пуску. Для гражданского космоса отдавали предпочтение ЖРД с их высокими удельными импульсами.

В настоящее время наблюдается растущий интерес к ГРД как для гражданского космоса, так и для программ военного назначения. Предполагается, что ГРД могут найти достойное место среди химических ракетных двигателей в текущем столетии, учитывая следующие факторы:

1. Схема ГРД проще, чем ЖРД. Одному из компонентов подачи не требуются специальные системы подачи и автоматического регулирования.

2. Требования к технологии изготовления твердого компонента ГРД значительно проще по сравнению с ракетным зарядом из ТРТ. Как правило, ГРД малочувствителен к трещинам, раковинам и другим неоднородностям состава и дефектам по сравнению с производством твердотопливного заряда, поскольку не содержит окислительных компонентов в своем составе.

3. ГРД допускают многократный запуск и изменения тяги в широких пределах, что необходимо при маневрировании, коррекции и стабилизации полета ракеты.

4. Наличие жидкого компонента топлива способствует регенеративному охлаждению сопла ракетного двигателя, что позволяет эффективно использовать топливо при высоких температурах сгорания. Твердотопливный заряд при этом может защищать стенки камеры сгорания двигателя от высоких температур газообразных продуктов.

В качестве *жидких окислителей* в ГРТ используют известные окислители ЖРТ: жидкий кислород, перекись водорода, фтор и его соединения, азотную кислоту, тетраоксид азота – N_2O_4 , тетранитрометан – $C(NO_2)_4$ и другие; в качестве *жидких горючих*: жидкий водород, керосин, гидразин, несимметричный диметилгидразин, пентаборан и другие.

В качестве *твердых окислителей* в ГРТ применяют окислители ТРТ: перхлораты, нитраты и др.

В качестве *твердых горючих* в ГРТ используют: синтетические каучуки, порошки металлов, гидриды металлов и др.

По величине расчетного удельного импульса ГРТ превосходят ТРТ и не уступают ЖРТ. В связи с большой плотностью горючего объемный удельный импульс ГРТ близок к ТРТ и значительно выше, чем у ЖРТ. Сравнительная характеристика удельного импульса $J_{уд}$, (Н·с)/кг и объемного удельного импульса $J_{уд. об.}$, (Н·с)/м³ ГРТ по сравнению с ЖРТ и ТРТ приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Сравнительные характеристики ракетных топлив
($p_k = 7 \text{ МПа}$) [3]

Вид топлив	$J_{уд}$, (Н·с)/кг	$J_{уд. об.}$, кН·с/м ³
ЖРТ		
O ₂ + H ₂	3910	1090
HNO ₃ + НДМГ	2760	3480
N ₂ O ₄ + НДМГ	2850	3360
ТРТ		
ПХА + Al + каучук	2600	4400
ПХА + Be + каучук	2800	4500
Высокоимпульсные	2900	4600
Высокоплотные	2600	5300
ГРТ		
H ₂ O ₂ + Al + пластик	2890	4350
HNO ₃ + Al + пластик	2730	4140
O ₂ + BeH ₂	3710	4860
Примечание: НДМГ (несимметричный диметилгидразин) – (CH ₃) ₂ NNH ₂		

Основные причины, задерживающие освоение ГРД:

- невысокая полнота сгорания (93–97 %);
- неравномерное выгорание топлива по длине ракетного заряда;
- низкая скорость горения твердых горючих по сравнению с ТРТ.

В настоящее время известны многокомпонентные твердые топлива, обеспечивающие при наличии жидкого окислителя достаточно высокое значение удельного импульса. Они состоят из порошка металла, термопластов, гипергольного компонента и его пластификатора. Из металлов применяют порошки алюминия с размером частиц не более 10 мкм. В качестве термопластов используют полихлорвинил, пластифицированный бутилфталатом, каучуком или полиуретаном. В качестве гипергольных компонентов (вещества, содействующие самовоспламенению ракетного твердого топлива при контакте с жидким окислителем) применяют твердые амины, например, паратолуидин, парафенилендиамины, диаминонафталин и другие. Введение в твердую фазу до 20% перхлората аммония приводит к уменьшению времени задержки воспламенения и улучшению характеристик горения [27].

14.2. Воздушно-реактивные топлива

Двигатели, в которых в качестве носителя окислителя и рабочего тела применяют атмосферный воздух, называют воздушно-реактивными (ВРД), а топливо в них – *воздушно-реактивными топливами*.

Если вместо воздуха используют воду, то такие двигатели называют гидрореактивными, а топливо в них – гидрореактивным топливом.

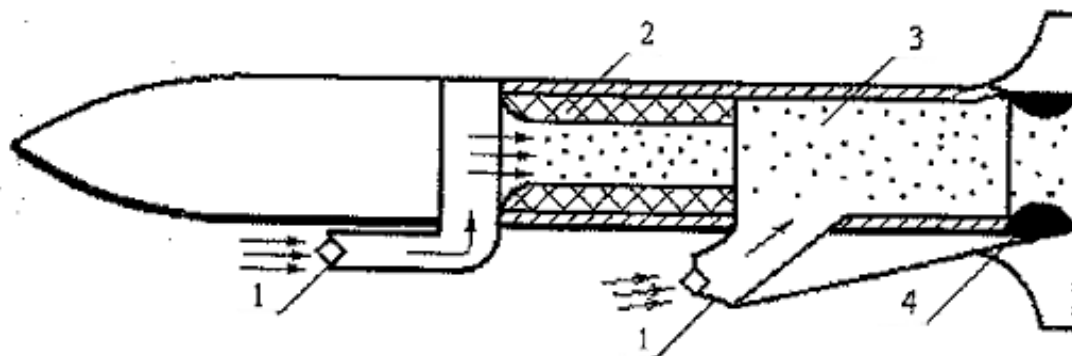
Различают воздушно-реактивные двигатели (рис. 14.2), (14.3)

- прямоточные воздушно-реактивные;
- ракетно-прямоточные.

Твердые топлива ВРД отличаются от твердых ракетных топлив содержанием окислителя; или он отсутствует в топливе, или присутствует в ракетном заряде в небольших количествах. Такое содержание окислителя предназначено лишь для частичной газификации, диспергирования и выноса конденсированной фазы с необходимой скоростью в зону сгорания. Полное окисление горючего осуществляется кислородом воздуха.

Прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) развивает тягу в полете за счет изменения количества движения струи воздуха, протекающей через двигатель, и теплоты выделяющегося при сгорании топлива.

Топливо в ПВРД выполняет роль источника тепловой энергии, а рабочим телом в основном является воздух, расход которого существенно превышает расход топлива. Принципиальная схема этого двигателя показана на рис. 14.2.



*Рис. 14.2. Принципиальная схема прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) [3]:
1 – воздушный заборник; 2 – заряд твердого топлива;
3 – камера сгорания; 4 – сопло*

Изменение количества движения струи воздуха в двигателе происходит вследствие подвода тепла, выделяемого в камере сгорания 3 при горении топлива 2. Воздух, поступающий в двигатель через воздушные заборники 1, является в данном случае и окислителем, и рабочим телом. Продукты полного сгорания покидают двигатель через сопло 4.

Повышенное давление в камере сгорания ПВРД, необходимое для его работы, обеспечивают путем торможения воздуха, поступающего в воздушный заборник со скоростью полета. С увеличением скорости полета давление в камере сгорания увеличивается, что повышает эффективность работы двигателя. Напротив, при низких скоростях полета ПВРД становится малоэффективен. Поэтому обычно требуется предварительный разгон за счет стартового двигателя до сверхзвуковой скорости полета, после чего начинает работать ПВРД в качестве маршевого двигателя [3].

Топливо для ПВРД обычно состоит из металлического горючего, органического горючего-связующего, окислителей и специальных добавок.

Из металлических горючих наиболее часто используют смесь или сплав Al с Mg; содержание металлического горючего достигает 70% от общей массы ракетного заряда.

В качестве органических связующих используют каучуки (полибутадиеновый и другие) с добавками сетчатого полистирола или углерода, нафталина и т.д. Содержание органического горючего не превышает 10%.

Твердыми окислителями служат перхлораты (например NH_4ClO_4 и другие), нитраты (например NaNO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$; их содержание в массе заряда достигает до 25%.

В качестве основных характеристик прямоточного двигателя используют:

- теплотворную способность топлива (теплоту сгорания);
- удельную тягу двигателя.

Наибольшей теплотворной способностью обладают металлы, бор и кремний, располагающиеся по величине удельной теплоты сгорания в следующей убывающей последовательности:

$$\text{Be} > \text{B} > \text{Al} > \text{Zr} > \text{Ti} > \text{Si} > \text{Mg}.$$

Углеводороды и другие органические вещества уступают металлам и бору [3].

Из теории ПВРД известно, что величина удельного импульса $I_{\text{уд}}$ (Н·с/кг, м/с) зависит от скорости и высоты полета и определяется следующим выражением [27]:

$$I_{\text{уд}} = \frac{P}{G} = \alpha L_0 v (\beta \sqrt{\theta} - 1), \quad (14.1)$$

где P – тяга двигателя, Н; G – расход топлива, кг/с; α – коэффициент избытка воздуха, равный количеству поступающего воздуха к стехиометрически необходимому количеству; v – скорость полета ракеты; L_0 – стехиометрическая постоянная, равная массе воздуха, теоретически необходимого для полного окисления одного килограмма топлива; β – коэффициент прироста массы, равный отношению расхода продуктов сгорания к

расходу воздуха; θ – относительный подогрев воздуха, равный отношению температуры торможения газов продуктов сгорания $T_{сг}$ к температуре набегающего потока воздуха T_B ;

$$\theta = \frac{T_{сг}}{T_B} = 1 + \frac{\Delta H_T}{(1 + \alpha L_0) c_p T_B}, \quad (14.2)$$

где ΔH_T – теплотворная способность топлива, Дж/кг; c_p – теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(кг·К).

Ракетный прямоточный двигатель (РПД) представляет собой гибрид РДТТ и ПВРД. Конструктивно такой двигатель отличается от РДТТ двухконтурной организацией рабочего процесса (рис. 14.3). На первой стадии, протекающей в газогенераторе (первичном контуре) двигателя, происходит воспламенение заряда твердого топлива 2, первичное горение и диспергирование твердого топлива за счет собственного окислителя. Продукты диспергирования через сопло 3 истекают во вторичный контур, куда под давлением скоростного напора поступает воздух из атмосферы через воздушный заборник 1. В камере дожигания 4 заканчивается процесс горения топлива до продуктов полного окисления в потоке воздуха, которые покидают двигатель через сопло 5. Твердое топливо РПД содержит до 60% окислителя, обеспечивая независимую от внешнего воздействия работу газогенератора и создавая определенный уровень тяги [3].

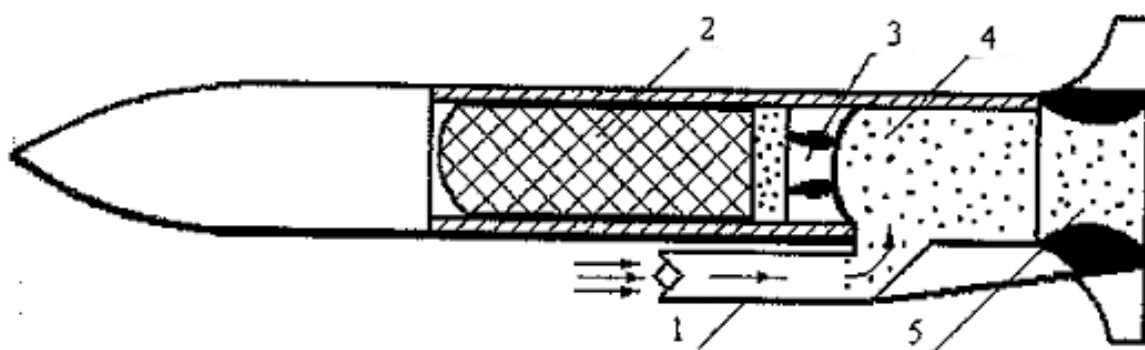


Рис. 14.3. Принципиальная схема ракетно-прямоточного двигателя (РПД) [3]:

- 1 – воздушный заборник; 2 – заряд твердого топлива;
- 3 – сопло ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ);
- 4 – камера сгорания; 5 – сопло РПД

Твердые топлива для таких двигателей наряду с высокой теплотворной способностью должны также иметь достаточно высокую собственную удельную тягу. Для этого необходимо обеспечить высокую температуру продуктов сгорания топлива за счет собственного окислителя большого количества легко воспламеняющихся дисперсных частиц металла.

Для топлив РПД характерен следующий состав основных компонентов:

- металлические порошки (Al или его сплавы) 40–60%;
- окислители (NH_4ClO_4 – перхлорат аммония) 30–50%;
- связующие вещества (каучуки) 10–15%.

Типовые составы топлив ПВРД и РПД и их основные характеристики приведены в табл. 14.2.

Таблица 14.2

**Характеристики типовых топлив
для воздушно-реактивных двигателей [3]**

Топливные композиции	ρ , кг/м ³	L_0 , кг _{в.} /кг _{т.}	I_m , кН·с/кг	$I_{об}$, кН·с/дм ³	$U_{гор}$, мм/с
РПДТ На основе Mg, нафталина и NaNO_3	1600-1800	2,8-6,1	7,3-9,0	2,8-15,4	8,00-50,0
На основе Mg, антрацена и NaNO_3	1500-1750	2,8-5,7	7,6-9,7	13,2-15,2	7,0-45,0
На основе Mg, антрацена и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	1750-1850	4,7-4,9	8,0-8,5	14,0-14,5	15,0-25,0
ПРД Несамосгорающие составы – на основе ароматических углеводородов;	1350-1450	9,1-9,5	10,0-10,2	14,1-14,3	-
- на основе производных бора	950-970	12,1-12,5	11,3-11,4	10,9-11,0	-
Примечание: I_m и $I_{об}$ – полетный удельный импульс тяги массовый и объемный при числе Маха $M=2$; $\alpha L_0 = 10$; $U_{гор}$ – скорость горения при $p = 2,0$ МПа					

Теплотворная способность топлив (табл. 14.2), составляет: ~ 20–55 МДж/кг.

Использование воздушно-реактивных двигателей. За рубежом ВРД разрабатывают для ракет тактического назначения и средней дальности класса «воздух-воздух», сверхзвуковых ракет «воздух-поверхность», а также зенитных ракет.

Твердые топлива ПВРД рассматривают как основу для активно-реактивных снарядов различного назначения калибром от 40 до 400 мм, что позволяет увеличить дальность стрельбы из артиллерийских орудий в 2–3 раза.

Особый интерес представляет применение ВРД для крылатых и управляемых ракет с гиперзвуковыми скоростями полета.

14.3. Гидрореагирующие топлива

Гидрореагирующие топлива, применяемые в торпедах и других изделиях, используют в качестве окислителя и рабочего тела заборную воду. Принципиальная схема двигателя с гидрореагирующим топливом показана на рис. 14.4.



Рис.14.4. Принципиальная схема гидрореактивного двигателя (ГРД) [3, 27]:

1 – выходное сопло; 2 – коллектор с форсунками для распыла воды; 3 – заряд твердого топлива; 4 – канал для ввода воды; 5 – корпус двигателя; 6 – водозаборник

При движении ракеты морская вода поступает в корпус двигателя 5 через специальный водозаборник 6 и канал 4 в коллектор 2, форсунки которого диспергируют воду на отдельные капли. В камере сгорания тепловая энергия заряда твердого топлива 3 затрачивается на испарение воды. Смесь паров воды и продуктов сгорания топлива при истечении из сопла 1 обеспечивает получение необходимой тяги.

Основное требование к гидрореагирующему топливу связано с возможностью получения высокой удельной теплоты ре-

акции с водой. Кроме того, вещества, применяемые в качестве топлива, должны энергично реагировать с водой. Указанные особенности требований к гидрореагирующим топливам обусловлены движением ракеты-торпеды в воде – среде значительно более плотной и вязкой по сравнению с воздухом. Поэтому большая часть энергии ГРД расходуется на преодоление гидродинамического сопротивления воды.

Топливо ГРД обычно содержит максимальное количество металлических горючих (порошки алюминия, магния, их смесей и сплавов), величина которых может достигать до 80%.

Минимальное и достаточное количество собственного окислителя в топливе для устойчивого диспергирования продуктов первичного горения составляет до 20%. Для этого в состав топлива вводят нитраты (например, нитраты натрия, калия, стронция и другие), перхлораты (например, перхлорат аммония и другие).

Связующие компоненты топлива и технологические добавки при их минимальном количестве должны обеспечить требуемые реологические и физико-механические свойства готовых зарядов. В качестве горючих связующих используют синтетические каучуки и другие вещества, обогащенные водородом и азотом. Приоритетом пользуются так называемые «активные» связующие, содержащие окислительные элементы (например нитрогрупп и соединений фтора).

Типовые составы гидрореагирующих топлив и их основные характеристики приведены в табл. 14.3.

Таблица 14.3

Характеристики типовых составов гидрореагирующих топлив [3]

Топливные композиции	ρ , кг/м ³	ΔH , МДж/кг	$U_{гор}$, мм/с
На основе Mg, NaNO ₃ , KNO ₃	1600-1800	14,0-19,0	10,0-60,0
На основе Mg, Al, NaNO ₃ , KNO ₃	1800-2700	19,0-27,0	10-,0-40,0
На основе порошка сплава Al и Mg, NH ₄ NO ₃	1700-2000	14,0-16,7	4,0-10,0
Примечание: ΔH – теплотворная способность при $T = 273\text{K}$, $p = 0,1\text{ МПа}$; $U_{гор}$ – скорость горения при $p_k = 1,0\text{ МПа}$			

Эффективность гидрореагирующего топлива оценивают величиной объемного удельного импульса тяги, возникающего при сгорании единицы объема топлива. Как и удельный импульс ПВРД, он зависит от расхода воды и твердого топлива:

$$\frac{G_B}{G_T} = \alpha L_0, \quad (14.3)$$

где L_0 – масса воды, необходимая для сгорания 1 кг топлива; α – коэффициент избытка воды; G_B , G_T – расход воды и топлива соответственно.

Удельная полезная мощность гидрореактивного двигателя пропорциональна удельной полезной мощности топлива (Вт/м^2), рассчитанной по формуле

$$W_{\text{уд}} = \frac{G_T}{S_M} (\Delta H_T), \quad (14.4)$$

где ΔH_T – теплотворная способность топлива; S_M – площадь сечения миделя торпеды (ракеты).

Гидрореактивные двигатели с большим значением $W_{\text{уд}}$ позволяют подводным аппаратам двигаться с большей скоростью и увеличивать глубину хода.

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику гибридным ракетным топливам (ГРТ). Какие основные компоненты входят в состав ГРТ и их функциональное назначение в топливной системе?
2. Дайте краткую характеристику воздушно-реактивным двигателям (ВРД). В чем заключается их эксплуатационное отличие от классических РДТТ?
3. Назовите известные типы ВРД. Дайте краткую характеристику прямоточным воздушно-реактивным двигателям (ПВРД) и используемым ракетным топливам.
4. Дайте краткую характеристику ракетным прямоточным двигателям (РПД) и используемым ракетным топливам.
5. Дайте краткое описание принципа работы ракетного двигателя на основе гидрореагирующего топлива.

Глава 15. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГИБРИДНЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ [2,11,12,14,27,28]

15.1. Приготовление топливной массы

В составах ракетных зарядов из гибридных, воздушно-реактивных и гидрореагирующих твердых топлив содержится большое количество металлических порошков и других твердых наполнителей, образующих сыпучую порошкообразную систему. Производство таких топлив и формование из них ракетных зарядов во многом аналогично *технологии пиротехнического производства*.

Несмотря на разнообразие составов и свойств отдельных компонентов, общая принципиальная схема производства гибридных твердых топлив включает в себя следующие технологические фазы:

- подготовка компонентов;
- получение топливной массы;
- уплотнение топлива и формование изделий;
- завершающие операции и сборка изделий.

Подготовка компонентов топливной массы: горючего, окислителя, связующего, технологических и других добавок предусматривает следующие основные процессы химической технологии – измельчение, сушку классификацию (рассев на фракции).

Измельчение компонентов. Металлические горючие в общем случае могут подвергаться контрольному просеву и сушке. Основные горючие – порошки алюминия и магния и их сплавы сушке не подвергаются; они не гигроскопичны, но обладают пиротформными свойствами.

Пиротформность – явление самовоспламенения некоторых веществ в контакте с воздухом при отсутствии внешнего источника нагревания. Самовоспламенение – резкое увеличение скорости экзотермических процессов при самонагревании вещества, приводящее к возникновению очага пламенного горения без источника зажигания.

Порошки магния, алюминия, алюминиево-магниевых сплавов и другие металлические порошки, как правило, поступают на предприятия герметично укупоренными в металлические банки. Операция вскрытия банок является пожароопасной, и поэтому управление работой осуществляется дистанционно. Устройство для вскрытия банок (рис. 15.1) состоит из станины, в верхней части которой установлен пилообразный согнутый по окружности диаметром, равным диаметру банки, нож. При ходе вниз нож по всей окружности прорезает днище банки, при ходе вверх извлекает вырезанное днище.

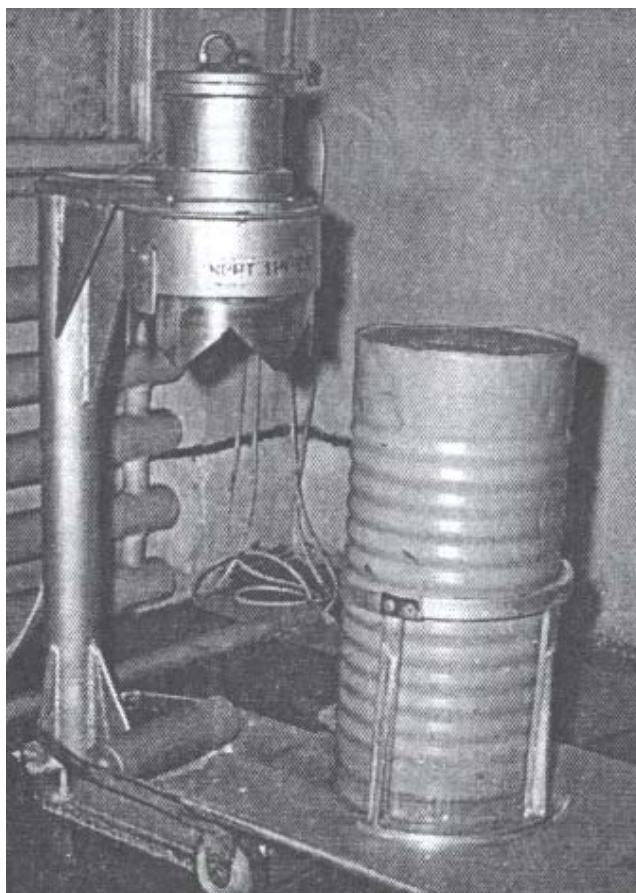
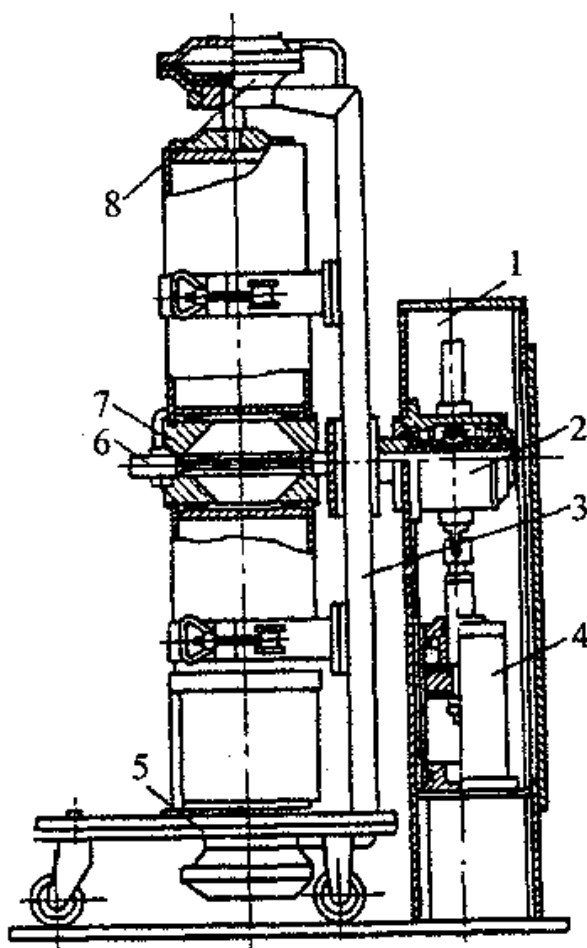


Рис. 15.1. Устройство для вскрытия банок с металлическим горючим [12]

Далее банка с металлическим горючим передается на устройство просеивания (рис. 15.2), в верхней части которого с помощью специального хомута крепится пустая банка (вверх дном). Вскрытую банку с металлическим горючим устанавливают на диск пневматического цилиндра 8 и закрепляют хомутом. После подачи сжатого воздуха в пневматические цилиндры

происходит стыковка пустой банки с банкой, содержащей горючий порошок; затем скрепленные банки поворачивают на 180^0 с помощью механизмов 2 и 3. Банка с порошком оказывается в верхнем положении, затем включают пневматический вибратор, прикрепленный к банке с порошком, и он через контрольную сетку пересыпается вниз. Операция контрольного просеивания длится 15–20 минут, после чего процесс повторяется.



*Рис. 15.2. Установка для просева металлических порошков [12]:
1 – станина; 2, 3 – механизмы разворота; 4 – пневматический цилиндр;
5 – тележка; 6 – вибратор; 7 – воронка; 8 – пневматический цилиндр*

Для измельчения окислителей и других твердых компонентов в случае необходимости используют барабанные (шаровые), вибрационные, струйные и другие типы мельниц.

Для тонкого и сверхтонкого измельчения твердых тел широко применяют газоструйные мельницы, в которых процесс происходит за счет встречного взаимного соударения частиц, разогнанных до скоростей 100–250 м/с и выше.

Автоматизированная линия для измельчения окислителей, цементаторов и других компонентов, состоит из шнекового питателя, молотковой дробилки, циклона, фильтра, струйной мельницы, вентилятора и воздухопроводов. Работа линии осуществляется в замкнутом цикле и включает в себя предварительное измельчение материала в дробилке, тонкий помол в струйной мельнице, классификацию в циклоне и очистку воздуха в фильтре; она характеризуется высокой производительностью и экологической безопасностью.

Сушка компонентов. Материалы, поступающие на профильные предприятия, содержат различное количество влаги. Большинство компонентов топлива подвергают сушке в составах серийного производства обычно до 0,1–0,2%, а в особых случаях – до сотых долей процента.

Для получения дисперсных материалов в сухом виде применяют, главным образом, конвективную сушку, как наиболее экономически целесообразную и обеспечивающую высокую надежность и интенсивность процесса. В конвективных сушилках тепло для процесса несет газообразный сушильный агент, непосредственно соприкасающийся с поверхностью материала. Пары удаляемой влаги уносятся тем же сушильным агентом. Если соприкосновение высушиваемого материала с кислородом воздуха недопустимо или пары удаляемой влаги взрыво- или огнеопасны, сушильным агентом служит инертный к высушиваемому материалу газ (азот, диоксид углерода, гелий и другие). В случае, когда удаляемая из дисперсного материала жидкость является ценным продуктом (спирты, эфиры, углеводороды и другие растворители), а также при сушке огне- и взрывоопасных материалов применяют схемы с полностью замкнутым циклом инертных газов. Для этого в технологическую линию включают дополнительные устройства для конденсации и удаления из системы испаряющейся влаги и одновременного осушения циркулирующих в системе газов.

Наиболее часто применяют аппараты с псевдоожиженным и вибрационным слоем, обычные и вакуум-сушильные шкафы, вакуум-гребковые сушилки, барабанные и трубчатые сушилки и другие.

Сушилки с псевдоожиженным и вибрационным слоем имеют главное преимущество – высокая интенсивность переноса тепла от слоя к поверхности теплообмена. Благодаря высоким значениям коэффициента теплоотдачи от слоя к поверхности практически весь температурный градиент сосредоточен в непосредственной близости к поверхности теплообмена. Возможность и эффективность сушки материала в псевдоожиженном или в вибрационном слое в значительной мере зависит от конструкции аппарата, гидродинамического режима движения высушиваемого материала и термодинамических условий процесса.

В сушильной установке с цилиндрической рабочей камерой (рис. 15.3), высушиваемый материал из бункера 1 питателем 2 непрерывно подают в сушильную камеру 3 в псевдоожиженный слой. Горячий воздух из калорифера 4 турбогазодувкой подают под опорную решетку. Высушенный продукт из аппарата выводят через патрубок, расположенный непосредственно над решеткой со стороны, противоположной загрузке, и собирают в приемный бункер. Отработанные газы направляются в циклон 5 и далее в рукавный фильтр 6.

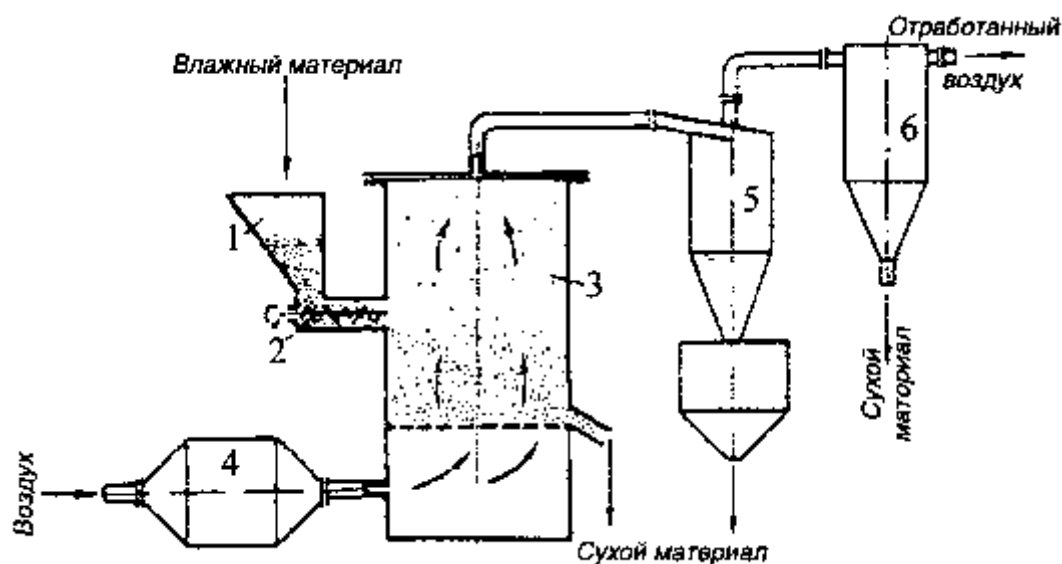


Рис. 15.3. Схема сушильной установки с цилиндрической камерой [12]:

*1 – бункер; 2 – питатель; 3 – сушильная камера; 4 – калорифер;
5 – циклон; 6 – фильтр*

Аппараты с вибропсевдооживленным слоем, учитывая их различные конструкции, по гидродинамическим условиям работы можно разделить на две группы. Сушилки, в которых псевдооживление, перемешивание и перемещение дисперсного материала происходит только под действием вибрации, и сушилки, в которых псевдооживление создается за счет вибрации и газового потока.

Классификация компонентов. Для получения требуемых физико-химических свойств топлива и изделий окислители и другие твердые компоненты классифицируют на отдельные гранулометрические фракции.

Приготовление составов. На этой стадии проводят: дозирование и смешение компонентов, гранулирование, сушку. Если топливные составы содержат в качестве горючих-связующих жидкие каучуки, эпоксидные смолы и т.п., осуществляют процесс их полимеризации приблизительно при 75–85 °С в специальных камерах.

В зависимости от химического состава и агрегатного состояния компонентов топлива применяют различные типы дозаторов и смесителей.

Дозаторы. Для периодического процесса изготовления топлива штучных изделий используют порционные дозаторы объемного и весового типа.

Смесители. Для операции смешения компонентов в требуемом соотношении применяют: гравитационные, объемные, вибрационные, лопастные, планетарные и другие типы смесительных устройств.

В промышленности для приготовления составов из сыпучих компонентов и дисперсных систем с большим содержанием твердой фазы в последние годы широкое распространение получили смесители с вертикально расположенными лопастями, совершая планетарное движение по окружности чаши смесителя и одновременно вращаясь вокруг своей оси. Смесители такого типа имеют ряд преимуществ перед смесителями с горизонтально расположенными мешалками, так как при этом сальниковые устройства и подшипники лопастей вынесены из рабочей зоны аппарата, упрощены условия удаления приготовленного состава за счет применения съемных чаш, устанавли-

ваемых на пневматических подъемниках, улучшены условия очистки лопастей от остатка состава. На рис. 15.4 показан общий вид одного из таких смесителей.

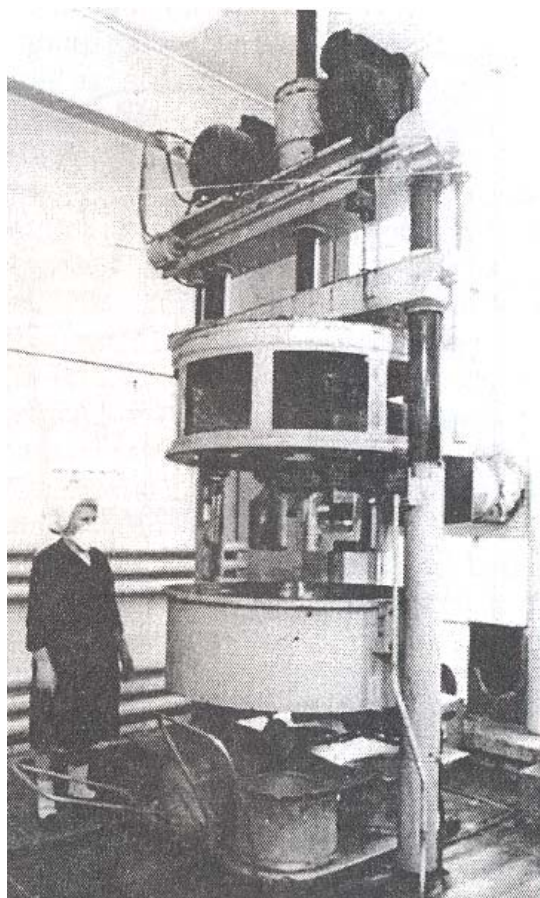


Рис.15.4. Планетарный смеситель С-200 [12]

Техническая характеристика смесителя С-200 [12]

Производительность, кг/ч	до 200
Единовременная загрузка, кг	70-100
Продолжительность смешения, мин	12-25
Вместимость чаши, дм ³	600
Частота вращения лопастей, об/мин:	
планетарное	10,4
относительное	47,8
Габаритные размеры, мм	
длина	1450
ширина	1800
высота	3750
Масса, кг	5155

На рис. 15.5 показана схема бипланетарного смесителя СБШ-2, предназначенного для приготовления сухих, лаковых и содержащих каучуки и высокомолекулярные смолы составов. Смеситель состоит из станины 1 с консолью 8, манипулятора 9, помещенного в станину, бипланетарной головки 4 и колпака 5, установленного на консоли 8, гидромотора 6, передающего вращение через зубчатую передачу 7 и головку 4 на мешалки 3. Чаша 2 снабжена рубашкой для обогрева, крепится к манипулятору 9. Бипланетарная головка включает в себя три планетарных цилиндрических редуктора, соединенных между собой через валы. Привод манипулятора пневматический.

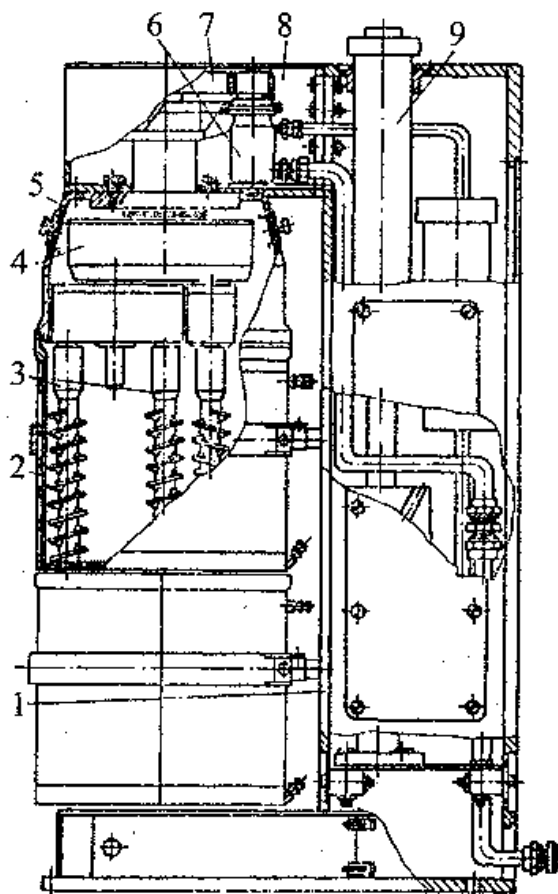


Рис. 15.5. Смеситель бипланетарный шнековый [12]:

*1 – станина; 2 – чаша; 3 – шнековые мешалки; 4 – приводная головка;
5 – колпак; 6 – гидромотор; 7 – зубчатая передача; 8 – консоль;
9 – манипулятор*

Значительный интерес представляют бипланетарные смесители с адаптивным режимом работы лопастей. Характерной

особенностью адаптивных бипланетарных смесителей является наличие обратной связи между кинематическими параметрами движения мешалок, определяющими технологические режимы процесса перемешивания, и физико-механическими характеристиками перемешиваемой массы. Это обстоятельство обуславливает адаптивный (самонастраивающийся) режим работы смесителя благодаря применению в качестве привода мешалок дифференциальных бипланетарных механизмов с избыточными степенями свободы, приводимых в движение от одного двигателя.

Для приготовления высококачественных к механическим воздействиям составов применяют смесители без перемешивающих органов (безлопастные смесители). К смесителям такого типа относят аппараты, в которых композиция перемещается под действием центробежного и гравитационного силового воздействия:

- барабанные смесители типа «пьяная бочка»;
- объемные баллонные смесители;
- объемные смесители типа «Турбула»;
- волновые вибрационные смесители.

С особенностями конструкций и принципами работы указанных типов смесителей можно ознакомиться в работах [11,12].

Грануляция топливных составов заключается в протирании их через металлическую сетку с определенным размером ячеек. В процессе грануляции состав приобретает большую сыпучесть и гранулы более равномерно распределяются по размерам, что улучшает его дозирование и заполнение матриц (пресс-форм) перед формованием изделий.

Смешение и грануляцию часто проводят в одном агрегате (например в планетарных и вибрационных смесителях-грануляторах).

15.2. Формование изделий

Для получения монолитных консолидированных изделий из сыпучих порошкообразных материалов применяют различные технологические процессы их уплотнения давлением, получивших название *компактирование твердых дисперсных сред*.

Использование того или иного способа компактирования ультрадисперсных порошков во многом определяется их физико-химическими свойствами. Каждая частица находится под действием системы внешних и внутренних сил и возбуждаемых ими энергетических полей. Внешние поля возникают за счет действия приложенных к материалу нагрузки (давления) и гравитационных сил. Внутренние поля возбуждаются межчастичными силами, источниками которых являются структурные элементы материала – отдельные частицы, формирующие массив изделия.

В общем случае могут в той или иной степени проявляться следующие виды физических и химических связей между частицами: силы химической природы, молекулярные силы, ионно-электрические силы, магнитные и силы механического сцепления.

Указанные силы могут вызвать следующие механизмы связывания между наночастицами порошковых материалов:

- взаимодействие между частицами в результате проявления химических связей, молекулярных сил притяжения (силы Ван-дер-Ваальса), электростатических (кулоновских) и магнитных сил;
- образование твердых «мостиков» между частицами вследствие действия следующих факторов: химических реакций, диффузии молекул на участках контакта, плавления веществ в зонах контакта частиц, кристаллизации растворенных веществ;
- соединения за счет связующего (адгезионные и когезионные мостики связующего);
- механические связи зацепления между частицами.

Преимущественное проявление того или иного из указанных факторов или механизмов взаимодействия частиц ультрадисперсных порошков зависит от их физико-химических свойств (состава, морфологии и состояния поверхности частиц, а также определяется перестройкой и изменением структуры в процессе хранения и компактирования при воздействии внешнего давления технологических машин и устройств).

В большинстве случаев компактирование порошкообразных сред осуществляют следующими механическими способами уплотнения:

- прессованием в замкнутую матрицу (пресс-форму);
- гидростатическим прессованием;
- проходным прессованием.

Прессование в замкнутой матрице (рис. 15.6, а-в) осуществляется в пресс-инструменте, включающем пуансон 1, матрицу 2 и поддон 3. Наиболее часто прессованием получают сплошные цилиндрические изделия. В этом случае его проводят в цилиндрической матрице; пуансон и поддон имеют плоские торцы. Процесс осуществляют в следующей последовательности. Порция порошка, величина которой определяется заданными размерами изделия и его плотностью, засыпается в матрицу, установленную на поддон. Затем в матрицу вставляют пуансон, к верхнему торцу которого с помощью механического или гидравлического прессов прикладывается определенное усилие. После снятия усилия спрессованное изделие удаляется из матрицы.

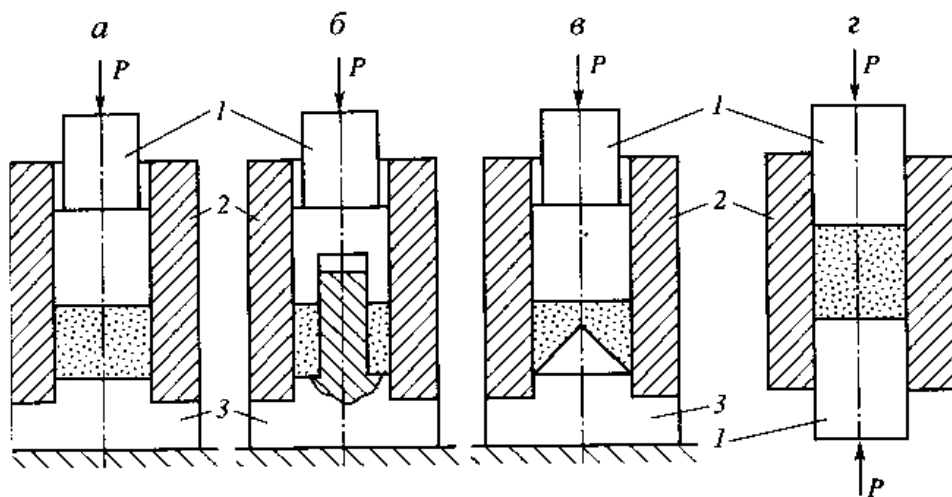


Рис. 15.6. Схемы одностороннего (а – в) и двухстороннего (г) прессования [11]:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – поддон; P – усилие, прикладываемое к пуансону

В процессе прессования между порошком и стенкой матрицы возникают силы трения, которые приводят к перепаду давления по высоте изделия. Особенно наглядно это проявля-

ется при прессовании относительно высоких изделий по отношению поперечного размера. Наибольшая величина давления наблюдается непосредственно вблизи торца пуансона и ее величина снижается по мере удаления от него. В результате прессованные изделия имеют различную плотность по высоте: максимальную у поверхности торца пуансона и минимальную на противоположном торце поддона. По мере увеличения высоты цилиндрического изделия по сравнению с диаметром плотность в объеме материала возрастает.

Для прессования изделий с более равномерным распределением плотности применяют пресс-инструмент с двумя подвижными пуансонами и осуществляют *двустороннее прессование* (рис.15.7, *г*). При этом способе прессования усилие со стороны пресса одновременно прикладывается к двум пуансонам, которые перемещаются навстречу друг другу. В результате наибольшая плотность материала образуется на торцах и меньшая в центре изделия.

Одной из основных характеристик процесса компактирования является зависимость плотности изделия от давления. В случае прессования порошка в замкнутой матрице зависимость получила название *кривой прессования*. Зависимость между плотностью материала и давлением прессования может быть выражена графически и аналитически. Математическое выражение зависимости давления прессования от плотности материала называют *уравнением прессования*.

При одностороннем прессовании порошковых материалов в замкнутой матрице обычно получают качественные изделия не более одного-двух диаметров, при двустороннем-двух-четырех диаметров. Изготовление изделий большего размерного соотношения указанными способами часто невозможно из-за существенной разницы в значениях плотности по высоте прессовки и, как следствие этого, их низкого качества.

При *гидростатическом прессовании* (рис. 15.7) порошок 3 засыпают в эластичную (например, резиновую) оболочку 5, которая находится в рабочей камере 4 прессового аппарата (гидростата) радиусом R_1 . Герметизация корпуса обеспечивается верхней 1 и нижней 7 крышками. В герметическую рабочую

камеру гидростата радиусом R_0 подается жидкость 6, в которой создается необходимое давление p с помощью специальных гидронасосов и мультипликаторов высокого давления, происходит уплотнение материала. Эластичные оболочки 5, как правило, изготавливают из специальных резиновых композиций на основе натуральных каучуков.

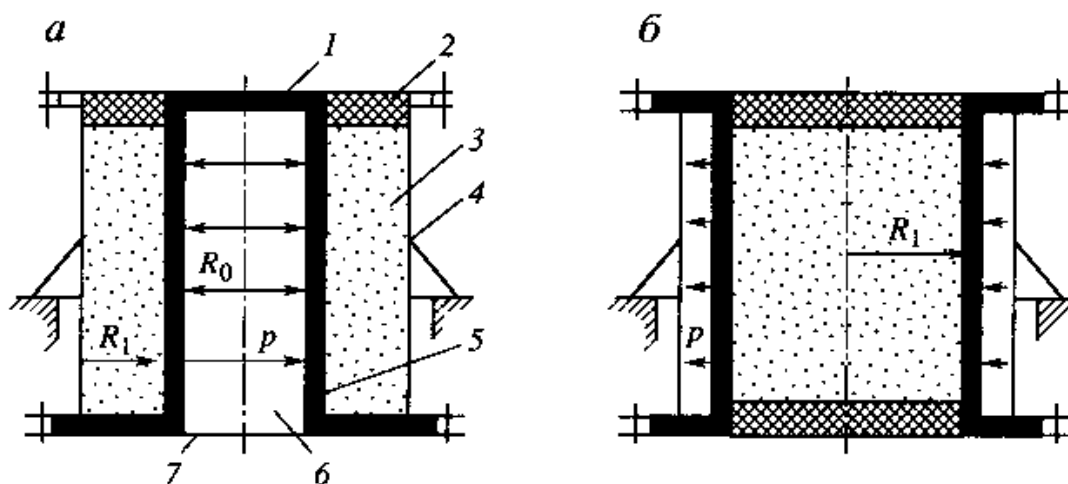


Рис. 15.7. Схемы установок гидростатического прессования изделий с центральным каналом (а) и сплошных изделий (б) из порошкообразных материалов [11]

По сравнению с обычным прессованием в данном случае отсутствует трение частиц порошка о стенки пресс-инструмента. Имеется также различие в перемещении частиц порошка: при обычном прессовании в замкнутой матрице частицы порошка смещаются вдоль боковой поверхности матрицы пресс-инструмента, а при гидростатическом прессовании частицы порошка, прилегающие к эластичной оболочке, перемещаются вместе с нею. Таким образом, при гидростатическом прессовании сжатие порошка является всесторонним и равномерным по величине во всех направлениях, плотность спрессованного материала практически однородна по объему изделия. При этом обеспечивается не только равномерная плотность изделия, но устраняется также анизотропия макроструктуры, связанная с ориентированным расположением частиц при одноосном сжатии и проявляющаяся в неодинаковых значениях прочности, усадки, газопроницаемости, упругом последствии в различных направлениях.

При гидростатическом прессовании величина сжимающего давления и работа объемного деформирования порошка для получения изделий одинаковой плотности меньше, чем при прессовании в замкнутой матрице.

Один из недостатков гидростатического прессования связан с трудностями соблюдения размеров изделия, близких заданным. По этой причине для крупногабаритных изделий применяют так называемый двухстадийный метод прессования. В корпус гидростата *1* вмонтирована эластичная оболочка *4* (рис. 15.8).

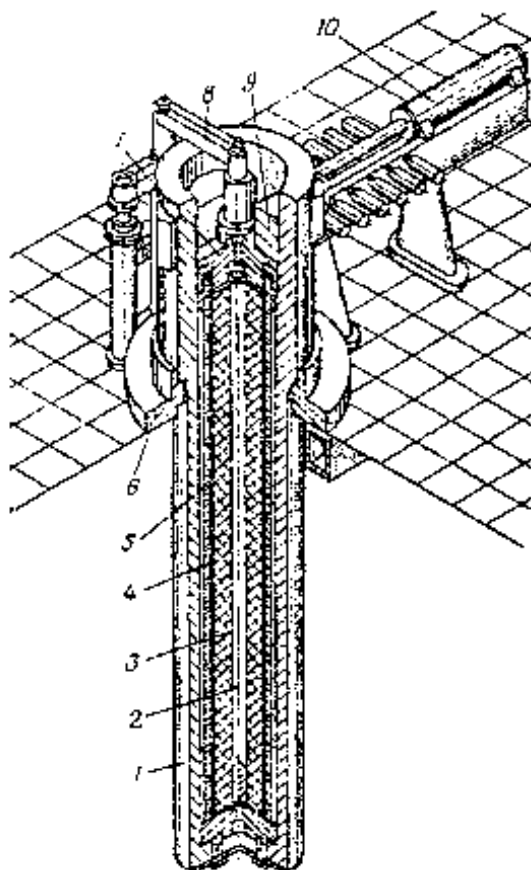


Рис.15.8. Схема гидростатической установки для двухстадийного формования изделий [12]:

*1 – корпус гидростата; 2 – игла; 3 – уплотняемый материал;
4 – эластичная оболочка; 5 – перфорированный цилиндр; 6 – опорный
фланец; 7 – уплотнительный узел; 8 – манипулятор для перемещения
крышки; 9 – шиббер; 10 – пневматический привод шиббера*

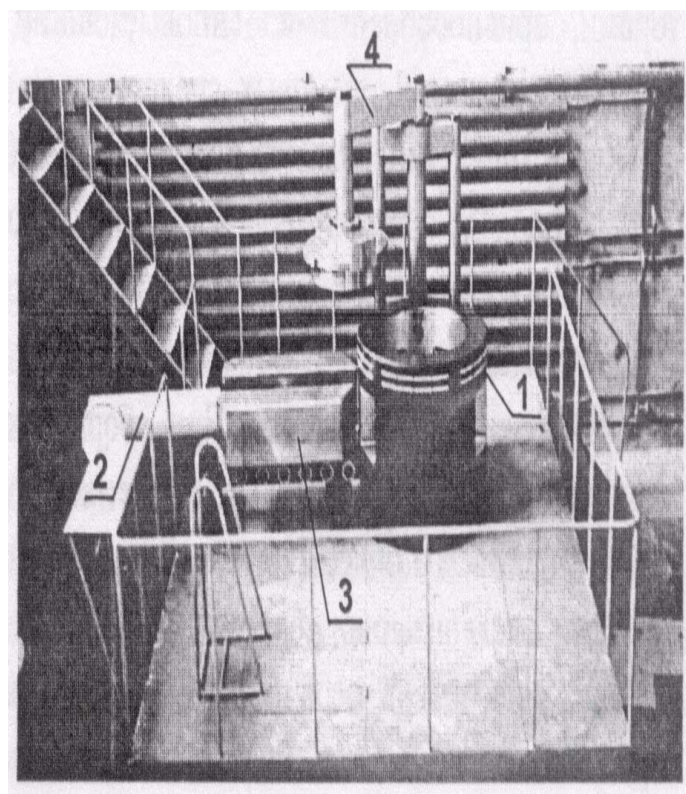
В нее помещают предварительно сформованные при относительно низком давлении заготовки небольшой высоты *3*, имеющие равномерную по объему плотность топлива. Давление предварительного прессования на гидравлических прессах

должно лишь обеспечить возможность транспортировки и вставки заготовок в оболочку. Далее гидростат закрывается крышкой, насосом высокого давления подается жидкость в гидростат и изделие уплотняется до заданной окончательной плотности. В качестве запирающего устройства используют два шибера 9, входящие в прорези корпуса гидростата 1.

Управление механизмами установки – дистанционное, на основе элементов электропневмоавтоматики. Необходимое давление рабочей жидкости создается гидрокомпрессором с производительностью 180 литров в час при давлении 250 МПа.

На рис. 15.9 и 15.10 показан общий вид гидростатической установки и гидравлического пресса усилием $2 \cdot 10^7$ Н, на которых формуют изделия диаметром до 700 мм и длиной до 5000 мм. Эти уникальные установки не имеют зарубежных аналогов.

На рис. 15.11 показана конструктивная схема производства моноблочных изделий с изготовлением заготовки на прессе усилием 10^7 Н и последующем обжатием в гидростате.



*Рис. 15.9. Общий вид гидростатической установки [12]:
1 – корпус гидростата; 2 – пневмоцилиндр; 3 – шиббер; 4 – манипулятор
для перемещения крышки*

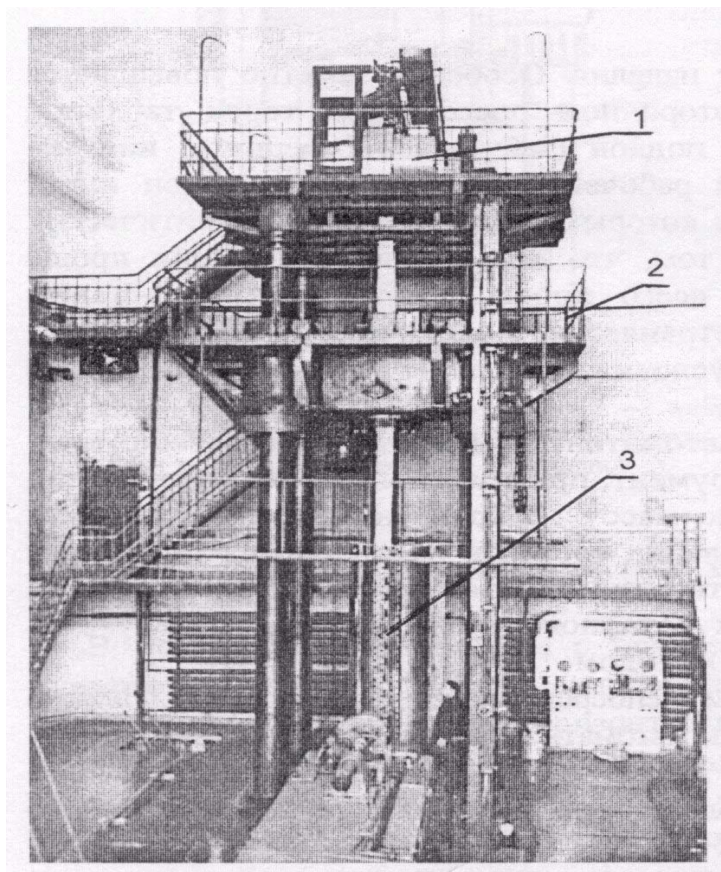
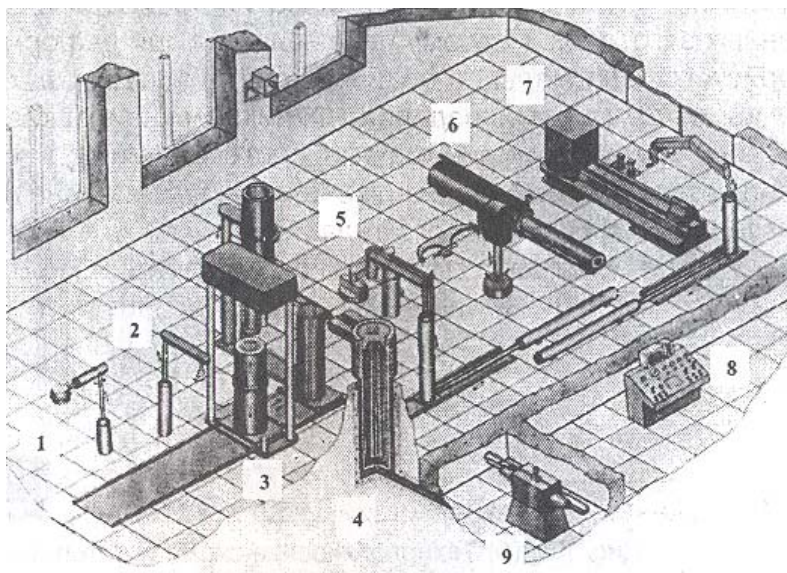


Рис. 15.10. Пресс усилием $2 \cdot 10^7$ Н



*Рис. 15.11. Конструктивная схема производства
моноблочных изделий [12]:*

*1 – дозирующее устройство; 2 – разравниватель; 3 – прессовая установка; 4 – гидростат; 5 – механизм перемещения крышки;
6 – транспортирующий робот; 7 – установка для бронирования изделий; 8 – пульт дистанционного управления; 9 – гидрокомпрессор*

Прходное прессование используют для получения изделий из порошкообразных композиций практически неограниченной длины. По этому способу отдельные порции материала пуансоном возвратно-поступательного механизма уплотняются в канале пресса и продавливаются через формующий пресс-инструмент, задающий форму и размеры поперечного сечения изделия. Выходящая из пресса шашка режется на заготовки требуемой длины на пневматических или гидравлических установках гильотинного типа.

На **завершающей стадии производства** осуществляют:

- извлечение спрессованного изделия из гидростата;
- извлечение иглы;
- контрольный осмотр и геометрические замеры изделия;
- ультразвуковую дефектоскопию;
- бронирование и упаковку изделия.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные производственные стадии изготовления гибридных ракетных топлив.
2. Что такое пиротформность металлических порошков?
3. Как осуществляют прессование порошкообразного материала в замкнутом пресс-инструменте?
4. Каким образом формуют изделия из порошкообразных материалов по технологии прессования в гидростате?
5. В чем заключается сущность технологии двухстадийного формования изделий?
6. Как и для чего используют способ проходного прессования порошкообразных материалов?

Глава 16. ПЛАСТИЧНЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА И ТОПЛИВА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ [2,3,5,7]

16.1. Пластичные ракетные топлива (ПРТ)

Общая характеристика ПРТ. Пластичные топлива для ракетных двигателей представляют собой композиции раздельной подачи или однокомпонентные составы, загущенные специальными добавками до состояния консистентных жидкостей (суспензий) или гелей. Поэтому ПРТ еще называют *гелеобразными ракетными топливами*.

Загущению может подвергаться один из компонентов топлива, обычно – горючее (например гидразин, керосин и другие углеводороды), реже – окислители. В качестве загустителей чаще всего используют соли высокомолекулярных кислот или высокомолекулярные соединения, реже – твердые высокодисперсные порошкообразные вещества высокомолекулярных соединений.

В загущенные горючие (гели) вводят металл в виде высокодисперсных твердых частиц и удерживают во взвешенном состоянии благодаря высокой вязкости этих систем. Полученное таким образом горючее попадает из бака ракетного двигателя под давлением инертного газа в камеру сгорания, где происходит реакция горения с поступающим жидким окислителем.

Топливные суспензии получают за счет диспергирования ультра- и нанодисперсных порошков металлов (например Al, Mg, Be, В и другие) в авиационные и ракетные керосины в количестве до 50–60%. Стабилизация этих порошков достигается за счет желатинизации системы и введения поверхностно-активных добавок, которые создают коллоидные системы, соответствующие по характеристикам вязким золям.

В ряде случаев для повышения прочности гелеобразные топлива армируют проволоочной сеткой или сотовыми конструкциями из металлов (Al, Mg) или полимерных материалов, которые одновременно являются горючими компонентами.

Армированные гелеобразные топлива сгорают с торца или центрального канала заряда, напоминая работу двигателя ТРТ.

Иногда порошок металла вводят в загущенный окислитель продуктов азотной кислоты, например, $C(NO_2)_4 - Al$; $CH_3NO_2 - Al$. В этом случае можно иметь однокомпонентное топливо.

Разработка гелеобразного топлива имеет целью:

- получить топливо с большим удельным импульсом, чем современные криогенные топлива, топлива длительного хранения для ЖРД или РДТТ;
- значительно упростить и удешевить технологию изготовления ракетных топлив;
- в некоторых случаях по возможности сочетать преимущества жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей.

Физико-химические основы получения ПРТ. Загущение нефтяных горючих производят растворением высокомолекулярных углеводородных веществ или солей жирных кислот с образованием коллоидных систем в виде золь или гелей.

Коллоидные системы (коллоидно-дисперсные системы, коллоиды) – предельно высокодисперсные (микрогетерогенные). Частицы дисперсной фазы в коллоидной системе размером порядка 1мкм свободно и независимо одна от другой участвуют в интенсивном броуновском движении в жидкости, равномерно заполняя весь объем дисперсионной (сплошной) среды.

Золь – седиментационно-устойчивые высокодисперсные системы с твердой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой. По сложившейся традиции золи часто называют *коллоидными растворами*.

Гель – высокодисперсные системы с жидкой дисперсионной средой, содержащей структурную сетку (каркас), образованный частицами дисперсной фазы. Типичные гели в виде студенистых осадков образуются из золь при их коагуляции или в процессе выделения новой фазы из пересыщенных растворов. По сложившейся традиции гели часто называют студнями.

В отличие от истинных растворов гели имеют структурированную систему в результате взаимодействия растворенных сольватированных частиц (макромолекул) и образования сетки или ячеек, в которых заключен растворитель. Благодаря этому резко повышается вязкость раствора по сравнению с исходным растворителем. Такие растворы в углеводородных средах называют *лиофильными золями*.

Вязкость лиофильных зелей зависит от концентрации дисперсной фазы и температуры. При больших концентрациях дисперсной фазы все в большей степени происходит взаимодействие между макромолекулами, и вязкость системы резко повышается. При увеличении концентрации дисперсной фазы или снижении температуры может произойти желатинирование системы.

Желатинированием называется физико-химический процесс, в результате которого под действием сил притяжения происходит соединение отдельных коллоидных частиц в рыхло построенные агрегаты, приводящие к образованию геля (студня) из золя.

В процессе желатинирования исчезают микроскопические разделения, и вся масса золя застывает в однородный студень (гель), имеющий характер полутвердого и полужидкого тела. Вместе с тем, при определенных условиях переработки (силового воздействия) золи с высокой вязкостью могут сохранять текучесть. Твердость образующегося геля тем больше, чем выше концентрация дисперсной фазы.

Гель может быть переведен в исходное состояние золя перемешиванием или другими механическими воздействиями. Этот процесс называется *тиксотропным разрушением геля*. Существует определенная температура для данного геля, при которой он переходит в золь; ее условно принимают за температуру плавления геля. В состоянии покоя (равновесия) такой золь вновь желатинизируется и превращается в гель.

Образование тиксотропного геля может быть объяснено возникновением взаимной связи частиц, образующих элементы структуры геля, которая легко разрушается при механическом воздействии. В результате гели не текут и не перемещаются

под действием силы тяжести, и диспергированные в них частицы не смешиваются и не осаждаются. Однако под действием внешних усилий (перепада давления, сдвиговых напряжений) такие гели становятся текучими, так как переходят в состояние золь.

При применении загущенных горючих, содержащих наполнители, необходимо учитывать их текучесть. Высокая вязкость и низкая текучесть могут препятствовать перекачиванию и распылению такого горючего при работе ракетного двигателя. С другой стороны, при низкой вязкости может происходить осаждение диспергированных порошков.

Таким образом, реологические свойства гелеобразных топлив составляют важную часть общей характеристики этих ракетных топлив.

Реологические свойства ПТТ. Явление фиксации пространственного положения частиц вследствие возникновения контактных связей между ними получило название «структурообразования дисперсных систем». Суспензии, в которых появились пространственные цепочки из частиц, называются *структурированными*. Структурирование радикально изменяет реологические свойства суспензий. Как правило, структурированные суспензии обладают свойствами неньютоновских жидкостей; для них характерно предельное напряжение сдвига, когда начинается свободное течение.

При перемешивании структурированная суспензия может превращаться в неструктурированную, т.е. состоящую из отдельных несвязанных одна с другой частиц. Обратимое изотермическое разрушение и восстановление связей между частицами получило название *тиксотропии*, а сами дисперсные системы с такими свойствами – тиксотропными.

На рис. 16.1 показаны кривые, характеризующие различные типы течения гелеобразных топлив, обладающих ньютоновскими свойствами (линия 1). В этих жидкостях относительная скорость деформирования меняется линейно с изменением напряжения сдвига. В случае тиксотропных материалов (кривая 2) необходимо приложить некоторое усилие – напряжение сдвига, прежде чем скорость перемещения станет линейной функцией напряжения сдвига.

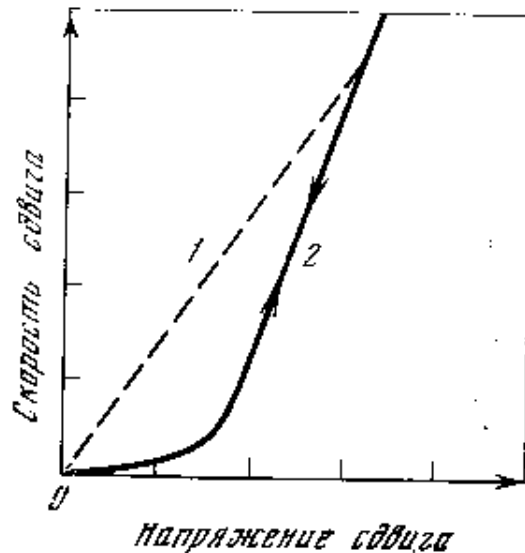


Рис. 16.1. Поведение идеальной (ньютоновской) жидкости (1) и тиксотропной системы (загущенного углеводорода) (2) [2]

При небольших напряжениях сдвига тиксотропная система медленно течет (ползущее течение) подобно поведению псевдопластичных жидкостей со степенным реологическим законом течения $\tau = k \dot{\gamma}^n$ или $\tau = \mu_{\text{эф}} \dot{\gamma}$, где τ – напряжение сдвига; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига (относительная скорость сдвига); n , k – реологические коэффициенты; $\mu_{\text{эф}} = k \dot{\gamma}^{n-1}$ – кажущаяся вязкость среды.

В начальный момент под действием силовых факторов структура суспензии стабильна (структура построения частиц и молекул), что вызывает уменьшение со временем кажущейся вязкости $\mu_{\text{каж}}$. В момент полного разрушения структуры системы при некотором предельном напряжении сдвига $\tau_{\text{пр}}$ относительная скорость течения становится линейной функцией напряжения сдвига и вязкость $\mu_{\text{каж}}$ остается величиной постоянной. С этого момента скорость процесса разрушения структуры равна скорости процесса восстановления структуры (структурообразования).

Для определения реологических свойств суспензий при установившемся течении можно воспользоваться моделью вязкопластичных сред в виде уравнения $\tau = \tau_{\text{пр}} + \mu_{\text{каж}} (dv/dx)$, в котором $\mu_{\text{каж}}$ – кажущаяся вязкость, тождественная пластической вязкости.

Состав пластичных твердых топлив. В качестве возможных рецептов гелеобразных топлив различают:

- композиции на основе криогенных топлив, хранимые при низких температурах;
- композиции на основе гидразина и углеводородов, хранимые при обычных температурах;
- армированные ракетные топлива.

Композиции на основе криогенных топлив. Для получения гелеобразных криогенных топлив проводят загущение жидкого водорода за счет введения порошков металлов с образованием топливной массы, например



В качестве желатинизирующих агентов жидкого водорода используют высокодисперсные порошки аэрогеля SiO_2 с высокой удельной поверхностью, гидриды щелочных металлов.

Известны случаи применения шугообразного водорода (суспензия 50%-го твердого водорода с 50%-м жидким) с добавками загустителя (например боргидрида металла) и бериллия. По сравнению с жидким водородом шугообразный водород имеет более высокую плотность и меньшие потери в условиях хранения [2].

Композиции на основе гидразина и углеводородов. В настоящее время более реальные для практического использования гелеобразные топлива – это композиции на основе гелеобразного гидразина (N_2H_4) с порошками металлов и различными окислителями (O_2 , N_2O_4 и другими). В гелеобразной системе $\text{N}_2\text{H}_4 - \text{Me} - \text{O}_2$ порошок металла добавляют в загущенное горючее (гидразин); окислитель подается в камеру сгорания ракетного двигателя самостоятельно по отдельной схеме. Для желатинирования гидразина применяют сложные эфиры полиэтиленгликоля и жирных кислот.

В США предлагается ракетное топливо, состоящее из 50–90% нитрометана с порошками металлов, загущенное 10% нитроцеллюлозы.

Известны гелеобразные топлива, в которых окислитель (перхлорат аммония) распределен в загущенных различными полимерами жидких горючих, например: $\text{NH}_4\text{ClO}_4 - 70\%$, угле-

водородное горючее (ракетный керосин) – 23–24%, каучук 1–12%. В загущенные системы вводят высокодисперсные твердые частицы металла, которые удерживаются во взвешенном состоянии, благодаря высокой вязкости горючего. Из бака ракетного двигателя под давлением инертного газа горючее попадает в камеру сгорания, в которой происходит реакция горения с жидким окислителем.

Гелеобразное армированное ракетное топливо. В ряде случаев для повышения прочности гелеобразные топлива армируют проволоочной сеткой или сотовыми конструкциями из металлов (Al, Mg) или полимерных материалов, которые одновременно являются горючими компонентами. Армированные гелеобразные топлива сгорают с торца или центрального канала заряда по принципу работы двигателя ТРТ [2].

16.2. Топлива специального назначения

Эта разновидность твердых топлив в ряде случаев существенно отличается от свойств штатных БТРТ и СТРТ, связанных с их целевым назначением и условиями эксплуатации. Условно выделяют наиболее характерные группы топлив следующего назначения:

- газогенерирующие;
- лазерные;
- плазменные.

Газогенерирующие топлива. Газогенерирующие топлива (ГГТ) представляют собой источник газов и энергии для газогенерирующих устройств различного назначения, широко используемых в ракетно-космической и военной технике, а также в народном хозяйстве. Газогенераторы вырабатывают сжатый газ из продуктов сгорания топлива либо со свободным истечением, либо в замкнутый объем. Для образования газообразных продуктов используют топлива различного агрегатного состояния: жидкие, твердые, гибридные и пастообразные.

Жидкие ГГТ могут быть однокомпонентные (перекись водорода H_2O_2 , гидразин N_2H_4 , изопропилнитрат $C_3H_7ONO_2$ и другие), а также двухкомпонентные (компоненты основного топлива ЖРД).

Твердые ГГТ являются наиболее компактным источником рабочего тела газогенератора, отличающимся высокой энергоемкостью. В общем случае температура продуктов сгорания составляет 1000–2000 К, а время работы – от нескольких секунд до нескольких минут. Большая продолжительность работы обуславливает низкую скорость горения топлива 1–2 мм/с и менее. Один из вариантов принципиальной схемы газогенератора для рулевого привода показан на рис.16.2.

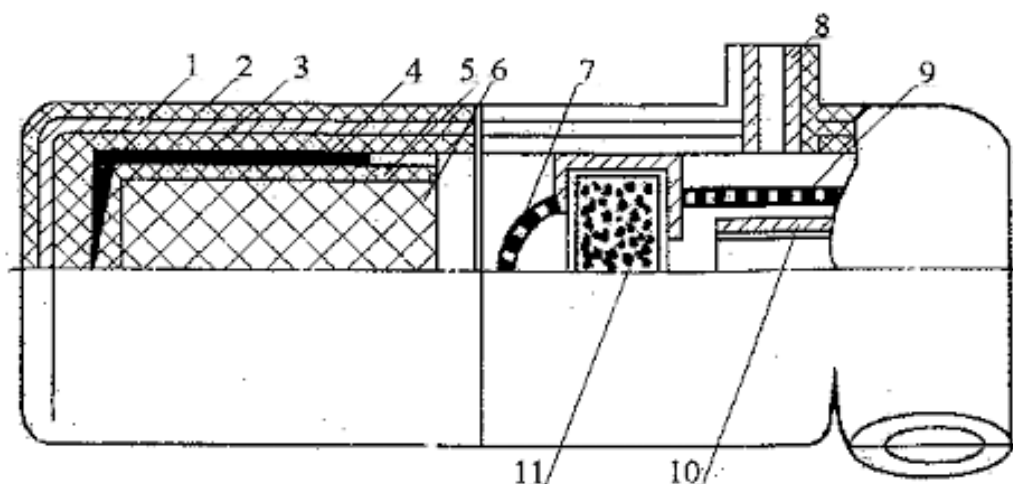


Рис. 16.2. Принципиальная схема генератора рулевого управления [3]:
 1 – камера; 2, 3 – наружное и внутреннее теплоизоляционное покрытие соответственно; 4 – заливочный состав; 5 – бронепокрывтие;
 6 – топливный заряд; 7 – ловушка; 8 – газовод; 9 – улавливатель;
 10 – форсажная труба; 11 – воспламенитель

Пороховые аккумуляторы давления (ПАД), обеспечивающие минометный старт ракет, используют в газогенераторах, работающих в замкнутом объеме с прогрессивной расходной характеристикой (отношение максимального расхода газовых продуктов G_{\max} к начальному расходу G_0 составляет $G_{\max}/G_0 = 10\text{--}30$). Вариант принципиальной схемы ПАД минометного старта ракет показан на рис. 16.3.

ПАД используют также в качестве источника рабочего тела различных приводов, наддува емкостей, быстрого открытия и закрытия крышек, люков, затворов и другого. Характеристики ПАД меняются в широком диапазоне:

- время работы до 15 с;
- расход газа от 10 г до 600 кг/с и более;
- температура истекающего газа от 400 до 3000 К.

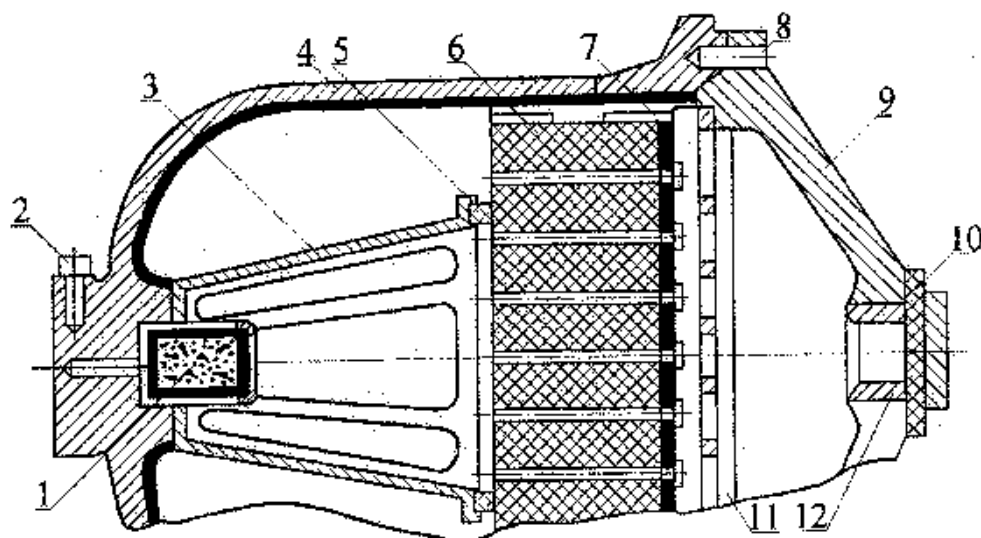


Рис. 16.3. Принципиальная схема порохового аккумулятора давления (ПАД) [3]:

1 – воспламенитель; 2 – пиропатрон; 3 – опора; 4 – корпус; 5 – амортизатор; 6 – топливный заряд; 7 – сухарь; 8 – болт; 9 – крышка; 10 – сопловая заглушка; 11 – сопловой вкладыш; 12 – диафрагма

Для снижения температуры газа до 400–1300 К продукты сгорания смешивают с испаряющимися жидкостями (парогенераторами).

Твердые топлива для газогенераторов в основе своей близки к ракетным и могут быть баллиститные или смесевые. Для обеспечения низкой температуры продуктов сгорания и скорости горения в составе баллиститных топлив основной пластификатор ракетных топлив – нитроглицерин частично или полностью заменяют на менее энергоемкий, но с большим удельным газообразованием. Кроме того, вводят специальные добавки, уменьшающие скорость горения топлива и ее зависимость от давления в камере сгорания.

В смесевых твердых топливах для уменьшения температуры продуктов сгорания и скорости горения в качестве окислителя используют нитрат аммония, циклические нитроамины (гексоген, октоген) и их смеси с перхлоратом аммония. В качестве горючих-связующих применяют синтетические каучуки, полиэферы, полистирол, ацетилцеллюлозу и другие. Скорость горения уменьшается за счет использования ингибиторов (соединений щелочных и щелочно-земельных материалов) и теплопоглощающих добавок.

Примерный состав ГГТ на основе смесового твердого ракетного топлива:

- окислители – 65–75 %;
- горючие-связующие – 10–30 %;
- специальные добавки – 5–10 %.

Температура продуктов сгорания при $p_k = 4$ МПа не превышает 2000 К, скорость горения составляет 1–5 мм/с, удельное газообразование 1,0–1,2 м³/кг, плотность топлива – 1600–1700 кг/м³.

Наряду с жидкими и твердыми типами ГГТ, используют композиции смешанного агрегатного состояния (гибридного типа), а также пастообразные и порошкообразные [3].

Лазерные топлива. Ракетное твердое топливо как химический источник активной среды используют в гидродинамических лазерах (ГДЛ) для создания когерентного (узконаправленного) потока энергии. На рис.16.4 показана принципиальная схема ГДЛ, активной средой которых является CO_2 .

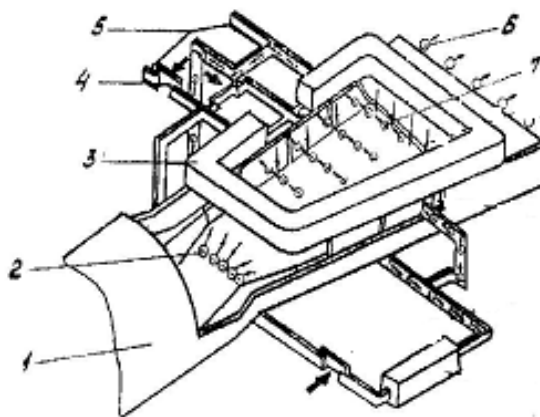


Рис. 16.4. Принципиальная схема МГД-генератора на твердом топливе

Рабочим телом в CO_2 -лазерах служит смесь газов CO_2 , H_2 и паров H_2O . Продукты сгорания топлива 2 из камеры сгорания 1 истекают через сопловой блок 3 и сопловую решетку 4 в резонатор 6, состоящий из зеркал 5, расположенных параллельно потоку. Одно из зеркал частично пропускает свет. В результате часть энергии газа превращается в направленное когерентное излучение, которое выходит через полупрозрачное зеркало.

Продукты сгорания топлива истекают через диффузор 7. Оптимальное соотношение компонентов газовой среды ГДЛ на CO_2 зависит от условий ее использования и составляет до 90 % N_2 , 5–8 % CO_2 , 1–3 % H_2O . Оптимальный уровень температуры продуктов сгорания составляет 1800–2000 К. В продуктах сгорания баллиститных и смесевых твердых топлив содержится недостаточное количество азота (примерно 15 %), значительный избыток водорода и паров воды (до 40 %), а также конденсированная фаза, наличие которой недопустимо в лазерных газах. Дополнительный наддув камеры сгорания азотом или воздухом не обеспечивает оптимальный состав лазерных газов.

Для получения требуемого соотношения газов в активной среде ГДЛ в состав унитарных лазерных твердых топлив баллиститного типа, кроме нитратов целлюлозы, необходимо вводить высокоазотистые маловодородные пластификаторы и наполнители, например вещества фуроксанового и фурозанового класса и другие.

В топливах смесевых типа целесообразно использовать безводородные и безгалоидные окислители и гетероциклические полиазотистые соединения с минимальным содержанием водорода.

Лазерные твердые топлива из продуктов сгорания должны обеспечить удельную энергию до 100–110 кДж/кг.

Газодинамические лазеры на твердом топливе в перспективе позволят создавать компактные мобильные установки, генерирующие излучение в непрерывном режиме высокой мощности для мирных и военных целей [3, 5].

Плазменные топлива представляют собой источник энергии и рабочего тела для магнетогидродинамического генератора (МГДГ). Принцип работы МГДГ на твердом топливе основан на прямом преобразовании тепловой энергии, выделяющейся при горении твердотопливного заряда, в электрическую энергию. По существу твердый электрический проводник заменяется потоком высокопроводящего газа в виде низкотемпературной плазмы, образующейся в результате сгорания топлива. Таким образом, заряд топлива в МГДГ должен обеспечить высокий уровень электропроводности и кинетической энергии продуктов сгорания.

Мощность генератора плазмы зависит от величины электрофизического комплекса σW^2 , где σ (См/м) – удельная электропроводность продуктов сгорания; W (км/с) – скорость движения продуктов сгорания.

Используемые твердые топлива в ракетных двигателях по основным характеристикам удовлетворяют требованиям, предъявляемым к плазменным топливам. Так, кинетическая энергия плазменного потока соответствует требованиям по энергетике твердых топлив в ракетных двигателях. Однако значение удельной электропроводности лучших по энергетике ТРТ составляет $\sigma = 0,005-0,010$ См/м, а требуемый уровень функционирования МГДГ по этому показателю должен быть на четыре порядка больше.

При создании плазменных топлив (ПТ) на базе БТРТ в состав топливной массы, кроме основных компонентов (нитратов целлюлозы и нитроглицерина) были введены элементы с низким потенциалом ионизации: Rb, Cs, K, Na, например в виде их нитратов в количестве 10–15 %.

Поскольку плазменное топливо должно обеспечить высокую (до 4000К) температуру, в состав топлива входит металлическое горючее – Al и Mg в количестве 20–27 %. Плазменные топлива имеют следующие характеристики продуктов сгорания:

$$T_k = 3700-3800\text{K}; \sigma = 50-150 \text{ См/м}; \\ \sigma W^2 = 200-400 (\text{См/м}) \cdot (\text{км/с})^2.$$

В плазменных топливах на основе смесового твердого топлива отсутствуют галогенсодержащие окислители. Вместо перхлоратов в качестве окислителей применяют нитраты и нитросоединения щелочных и щелочно-земельных металлов. В состав горючих-связующих веществ входят компоненты, содержащие энергоемкие группировки и легко окислительные элементы.

Смесевые плазменные твердые топлива в общем случае обеспечивают более высокий, по сравнению с баллистическими плазменными топливами, уровень рабочих характеристик, в частности σW^2 до $950 (\text{См/м}) \cdot (\text{км/с})^2$.

Импульсные МГДГ на твердом топливе могут быть использованы в военных целях для питания мощных оптико-квантовых генераторов, сверхдальней связи, а также для создания высокоскоростного оружия (скорость полета снаряда до 3-7 км/с за счет электродинамического ускорения). Они также широко применяются в геофизических исследованиях земной коры и верхней мантии для поиска полезных ископаемых и изучения глубинного строения Земли.

Высокометаллизированные плазменные топлива с температурой до 4500 К используют также для создания помех (ложных целей) в средствах защиты головных частей межконтинентальных баллистических ракет (МБР) и авиационных аппаратов от снарядов и ракет противника с различными системами наведения.

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику пластичным (гелеобразным) твердым ракетным топливом (ПРТ).
2. Какие основные физико-химические процессы происходят при загущении горючих компонентов ПРТ?
3. Дайте характеристику реологическим свойствам ПРТ. Что такое тиксотропия гелеобразных структур?
4. Назовите топлива специального назначения, которые производят с использованием твердых ракетных топлив.
5. Что такое газогенерирующие топлива (ГГТ)? Назовите примеры их применения.
6. Дайте краткую характеристику лазерным топливам. Какую роль они выполняют в газодинамических лазерных установках?
7. Дайте краткую характеристику плазменным топливам. Какую роль они выполняют в магнитных гидродинамических генераторах?

Глава 17. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

[5–7, 29–34]

17.1. Пожаро- и взрывоопасность при обращении с энергонасыщенными материалами

Способность твердых ракетных топлив легко воспламеняться при механическом и тепловом воздействии вызывает повышенную пожаро- и взрывоопасность на многих технологических фазах производства и требует специальных мер защиты.

Пожаро- и взрывоопасность при обращении с энергонасыщенными конденсированными системами (ЭКС), в том числе и ракетными твердыми топливами, – это комплекс организационных и технических мероприятий при производстве, перевозке, применении, хранении и уничтожении взрывчатых материалов (ВМ) и изделий из них. Проведение таких мероприятий исключает возможность возникновения аварийных ситуаций или резко снижает их количество.

Организационно эти мероприятия оформлены нормативами, которые устанавливают требования к размещению и конструкции зданий, сооружений, их проектированию, строительству и эксплуатации при перевозке, хранению и применению ВМ.

Любое производство ЭКС должно осуществляться в соответствии с Правилами устройства заводов по производству ВМ и изделий на их основе. Дополнительно к ним для наиболее важных и опасных элементов (фаз) технологии, специального оборудования и защитных сооружений действуют отдельные нормативные документы, например Руководство по устройству и эксплуатации систем пожарной защиты (РУЭ-АПЗ).

Согласно закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» важнейшим элементом защиты обслуживающего персонала, населения и территорий является обеспечение пожаро- и взрывобезопасности производства и эксплуатации ВМ и изделий на их основе.

В зависимости от тяжести аварийных последствий и экологических нарушений концепция обеспечения пожаро- и взрывобезопасности производства и эксплуатации ВМ и изделий на их основе может исходить из трех основных критериев:

- недопущение загорания;
- предотвращение массового пожара;
- исключение возникновения и развития взрывных явлений.

Указанная концепция отражена в Правилах устройства . . .
– правила эксплуатации предприятий по изготовлению порохов, ракетных твердых топлив, взрывчатых веществ, пиротехнических средств и составов, средств инициирования и изделий военной техники на их основе.

Правила обязательны для всех предприятий и организаций, полигонов, лабораторий, опытных баз вузов, площадок для уничтожения и захоронения отходов, зданий и сооружений систем очистки и обеззараживания вредных выбросов, изготавливающих и применяющих пороха, ракетные твердые топлива (ТРТ), взрывчатые вещества (ВВ), пиротехнические средства и составы, средства инициирования и изделия военной техники на их основе.

Правила устанавливают классификацию производств по степени их опасности, уровни защиты и расчетные загрузки зданий, разделительные безопасные расстояния. Определяют требования к охране предприятий, путям сообщения и транспорту, тепло-, газо-, водоснабжению и канализации, внешним электротехническим устройствам, автоматизации процессов.

В Правилах указаны требования к производственным зданиям и помещениям (сооружениям) категорий А, Ал, Б, В, Г и подземным зданиям. Особые требования предъявляются к хранению взрыво- и огнеопасных веществ и изделий, складским зданиям, коммуникациям, а также сооружениям для проведения испытаний.

Конструкции защитных устройств должны выполняться в виде экранов, укрытий, лабиринтов, противопожарных стен, перегородок, дверей, шиберов, локализаторов.

Требования к инженерному оборудованию зданий касаются отопления и вентиляции, водопровода и канализации, системы противопожарной защиты, а также электротехнических средств (связь, сигнализация, электроснабжение и т.п.).

Архитектурно-планировочные решения производств должны позволять полностью или частично локализовать действие

поражающих факторов взрыва ВМ, обеспечить защиту работающих, оборудования в зданиях и на территории предприятия.

Правила устанавливают порядок допуска к работе, обучения, инструктажа по охране труда и технике безопасности, производственной санитарии и пожарной безопасности. Они включают в себя требования к оформлению технической документации, составлению инструкций по охране труда, планировок, норм загрузки, а также к основным правилам ведения работ и оборудованию огне-и взрывоопасных производств.

Правила определяют меры и средства защиты при производстве бризантных ВВ, снаряжении боеприпасов и ракет, производстве промышленных и инициирующих ВВ, пиротехнических составов, баллистических порохов, ТРТ и зарядов из них, снаряжении средств воспламенения и взрыва, производстве пироксилиновых, сферических порохов, дымных порохов, сгорающих гильз и зарядов из них, изготовлении и сборке патронов. Устанавливают требования к производству ТРТ, изготовлению ракетных твердотопливных зарядов.

Сложность решения проблемы безопасности в производстве БТРТ и СТРТ заключается в особенностях горения этих топлив с высокой скоростью и без кислорода воздуха. Это исключает возможность использования противопожарных систем, подавляющих реакции окисления в пламенной зоне и устраняющих тепловой поток в конденсированную зону, что оказывается эффективным при горении многих материалов. Поэтому отсутствие кислорода во внешней среде и исчезновение пламенной зоны не останавливает горение порохов и ТРТ. Для прекращения горения необходимо резко охладить поверхность горящего вещества, что уменьшит тепловой поток с поверхности вглубь материала. Одним из наиболее эффективных способов охлаждения является подача к горячей поверхности воды, преимуществом которой по сравнению с другими веществами является высокая теплота парообразования, доступность и относительная дешевизна. При этом в зону загорания вода должна подаваться как можно быстрее и с большим ее расходом.

Выполнить указанные требования возможно при условиях индикации загорания высокочувствительными датчиками, наличия в подводящем водопроводе быстродействующего за-

порно-пускового устройства (клапана) и предварительного заполнения водой под избыточным давлением всего трубопровода от клапана до распыляющего устройства.

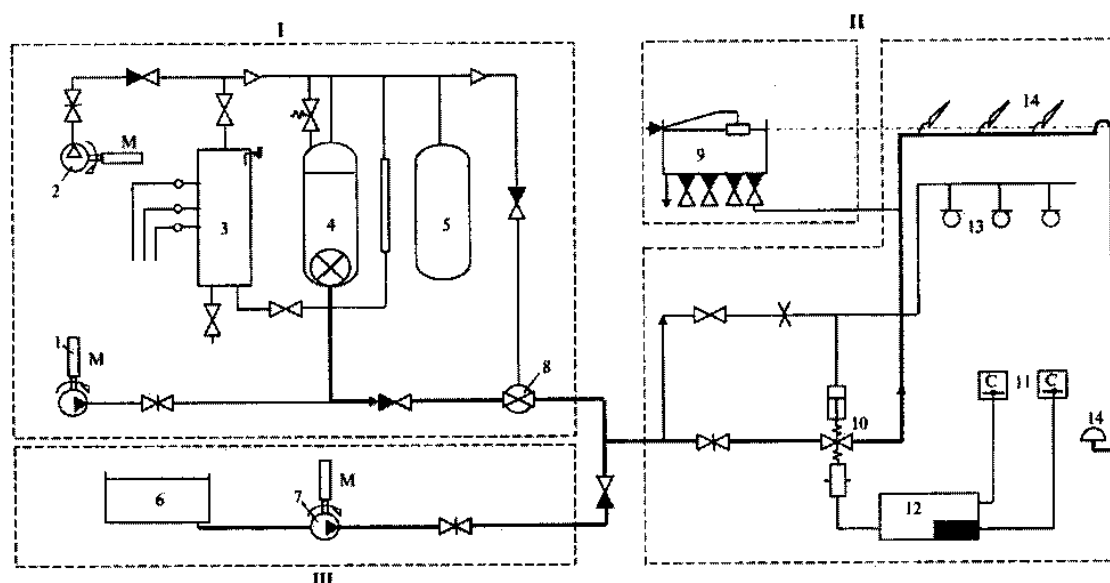


Рис. 17.1. Структурная схема автоматизированной противопожарной защиты [5]:

I – пневматическая станция; II – секция системы; III – централизованный водяной питатель; 1, 2 – насос и компрессор для автоматической стабилизации уровня и давления в водовоздушном баке; 3 – бачок сигнализаторов уровня; 4 – водовоздушный бак; 5 – ресивер; 6 – пожарный резервуар; 7 – насос; 8 – насосный поплавковый клапан; 9 – бачок для автоматического заполнения водой распределительных трубопроводов; 10 – запорно-пусковое устройство (клапан); 11 – датчик пламени; 12 – контрольно-пусковая станция; 13 – тепловые замки; 14 – насадки

Все эти условия были выполнены в системе БАПС (быстродействующей автоматической пожаротушающей системе), которая включает в себя следующие узлы и элементы (рис. 17.1):

- водопитающую насосную станцию с пожарными насосами;
- датчики индукции загорания с контрольно-пусковыми устройствами, логическими и коммутирующими устройствами для взаимодействия с автоматизированной системой управления технологическим процессом;

- запорно-пусковые устройства (клапаны, пламеотсекатели – гидрозатворы);
- водораспыляющие устройства (насадки);
- устройства автоматического заполнения водой всех распределительных трубопроводов от запорно-пусковых устройств до насадков;
- магистральные соединительные и распределительные трубопроводы.

17.2. Автоматизация производств

Автоматизация производства твердых ракетных топлив (АП ТРТ) – применение комплекса технических средств, методов, алгоритмов и систем управления, полностью освобождающих человека на основных опасных операциях от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов и информации.

Основной целью АП ТРТ является:

- обеспечение безопасности протекания технологических процессов;
- полный вывод обслуживающего персонала из опасных зон производства; совершенствование управления производственными процессами;
- обеспечение регламентированного уровня качества продукции.

Реализация этих мероприятий приводит в целом к улучшению технических и экономических показателей производства.

В систему АП ТРТ входят:

- оператор (диспетчер);
- управляющая вычислительная машина (УВМ);
- машины централизованного контроля и регулирования;
- средства связи оператора с УВМ и управляемыми объектами;
- система датчиков и исполнительных устройств технологических объектов.

Система обеспечивает контроль за состоянием и параметрами работы технологических объектов (например, дозаторов, смесителей, сушилок, прессов, теплообменников и других технологических машин и аппаратов). Управление заданными режимами технологического процесса (например, пуск и остановка оборудования, включение и выключение насосов и компрессорных установок, открытие и закрытие вентилей, клапанов, задвижек и т. п.) осуществляется на основании дистанционного и автоматического сбора и обработки получаемой информации.

АП ТРТ базируется на широком применении научных принципов идентификации объектов управления и создании математических моделей объекта управления с определением условий оптимизации. Широкое использование научных принципов позволило создать дистанционно управляемые современные технологии баллистических и смесевых твердых ракетных топлив.

17.3. Экологическая безопасность

Понятие экологической безопасности распространяется практически на все известные техногенные объекты, в том числе связанные с производством и эксплуатацией ВМ, включающих:

- изделия, в которых используются ВМ;
- предприятия-изготовители;
- технологическое оборудование;
- системы транспортирования и хранения.

К этим понятиям относятся различные виды антропогенной деятельности, обеспечивающие функционирование этих объектов. Например, подготовка исходных компонентов, изготовление ВМ, испытание опытных образцов, использование по прямому назначению, утилизация изделий, уничтожение отходов и т.п.

Безопасность производства ВМ может быть улучшена путем разработки и применения экологически более безопасных компонентов твердого ракетного топлива. Так, в продуктах сгорания СРТТ на основе окислителя перхлората аммония содержится до 0,2 % мас. соляной кислоты. При каждом запуске космического многоразового корабля «Шаттл» выделяется до 190,5 тонн ток-

сичных продуктов. Использование экологически безопасного окислителя АДНА (аммонийдинитрамида) в ТРТ для ускорителей типа «Шаттл» до 7 раз снизило бы выделение HCl в низших слоях атмосферы и значительно уменьшило бы эффект воздействия продуктов сгорания на озоновый слой Земли.

Промышленное производство БТРТ связано с использованием в составах токсичных компонентов и требует конструктивных мер по защите воздушной и водной среды. Особенности технологии производства баллиститных топлив заключаются в проведении большинства производственных операций в водной среде. В производстве пороховой массы расход воды составляет 10–20 м³ на одну тонну топливной массы. В связи с этим основной задачей по охране окружающей среды является очистка сбрасываемых в водоемы сточных вод и сокращение их количества за счет многократного использования воды в обороте.

Важность инженерных мероприятий по очистке сточных вод определяется не только количеством сбрасываемых вод, но и их токсичностью и значительным содержанием в сбрасываемых водах растворимых и содержащихся в суспензиях и эмульсиях компонентов исходного сырья или готовой пороховой массы.

В табл. 17.1 приведены токсикологические характеристики некоторых компонентов баллиститных пороховых масс.

Таблица 17.1

Токсикологические характеристики основных компонентов баллиститных порохов [5]

Наименование компонентов	ПДК в воздухе, мг/м ³		ПДК в воде, мг/л		Растворимость в 100 г Н ₂ О при 20 ⁰ С	Максим. содержан. в отжим. воде, мг/л
	рабочая зона	атмосфера	водоемов	биолог. сооружен.		
Нитроглицерин	0,02	0,001	0,01	150	0,16	1300
Динитротолуол	-	0,01	0,5	50	0,047	120
Дифениламин	5	0,007	0,01	50	0,0052	5
Гексоген	-	-	0,1	50	0,01	12
Централит	-	-	1,0	25	0,032	50

Как видно из данных таблицы, концентрация токсичных компонентов в воде существенно превышает не только ПДК для водоемов, но и для биологических очистных сооружений.

Таким образом, обезвреживание сточных вод на всех фазах производства баллистических порохов и ТРТ является исключительно важной инженерной задачей. Кроме санитарных требований, имеют значение и экономические требования, связанные с большой стоимостью свежей воды в сравнении с оборотной, а также потери сырья и полуфабрикатов (нитроцеллюлозы, нитроглицерина, пороховой массы и других компонентов).

При производстве СТРТ, получаемых методом литья, вода непосредственно в технологическом процессе не используется и служит только для вспомогательных целей (например, мытья оборудования и помещений, орошения режущего инструмента при механической обработке шашек и прочее). Вместе с тем, практически все компоненты СТРТ в той или иной степени могут наносить вред окружающей среде.

В связи с применением растворителей и моющих средств для удаления из смесителей остатков топливной массы эти вещества могут находиться в воде.

Вредные порошкообразные вещества, например, алюминий, октоген и другие, могут попадать в атмосферу при плохой очистке воздуха, отводимого через вентиляционные установки.

Основное количество окислителя – перхлората аммония поступает в сточные воды на фазе подготовки порошков и при их вакуумном транспортировании.

Каучуки и смолы практически не растворяются в воде, но при попадании в нее могут выделять токсичные органические вещества.

ПДК некоторых веществ, используемых в составах СТРТ, приведены в табл. 17.2.

Таблица 17.2

ПДК некоторых компонентов СТРТ [7]

Вещество	ПДК	
	в воде, мг/л	в воздухе, мг/м ³
Перхлорат аммония	5,0	1,0
Гексоген	0,1	1,0
Октоген	0,1	1,0

Вещество	ПДК	
	в воде, мг/л	в воздухе, мг/м ³
Алюминий	-	2,0
Взвесь горючего-связующего	2,0	-
Неотвержденная топливная масса	2,0	-
Стружка СТРТ	2,0	-
Парахинондиоксид	0,1	-

При очистке сточных вод в производстве СТРТ используют различные методы:

- выделение примесей отстаиванием и фильтрованием;
- окислительно-восстановительные электрохимические способы;
- высаливание из сточных вод растворенных веществ переводом их в трудно растворимые соединения с последующим выделением в процессе кристаллизации;
- биохимическая очистка.

В случае необходимости проводят дополнительную очистку биологически очищенной сточной воды с использованием активированных углей и ионообменных смол.

17.4. Безопасность электростатическая

В производстве твердых топлив среда электризуется при перемещении твердых и сыпучих материалов, жидкостей или многофазных композиций относительно твердых поверхностей. Статическое электричество накапливается при диспергировании жидкой или твердой фазы в жидкости или газе, при смешении и разделении фаз и при многих других процессах, особенно, если один из взаимодействующих материалов является диэлектриком.

Диэлектрики – вещества, плохо проводящие электрический ток; электропроводность диэлектриков очень мала, их удельное электрическое сопротивление $\rho \sim 10^8 - 10^{17}$ Ом · см.

Электростатическая безопасность связана с отсутствием условий для возникновения начального очага загорания в горючей среде из-за разряда статического электричества.

Условия электризации определяют возможность возникновения разных видов разрядов статического электричества и их зажигающую способность.

Плотность зарядов, остающихся на частице после ее отрыва от диэлектрической или проводящей поверхности, зависит от следующих факторов:

- плотности зарядов двойного электрического слоя;
- линейных размеров и формы контактного пятна;
- напряженности внешнего электростатического поля;
- электрофизических свойств контактирующих материалов, в том числе удельного объемного и поверхностного сопротивления, электропрочностных свойств среды;
- способа и скорости разделения контактирующих поверхностей.

К основным способам обеспечения электростатической безопасности относят:

- заземление проводящих элементов оборудования;
- увеличение объемной и поверхностной проводимости диэлектриков;
- использование нейтрализаторов;
- подбор контактных пар;
- проведение технологических процессов в средах, в которых разряд статического электричества не представляет опасности.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные факторы пожаро- и взрывоопасности при обращении с взрывчатыми материалами.
2. Охарактеризуйте противопожарную систему БАПС, используемую на предприятиях по производству энергонасыщенных материалов (ЭНМ) и изделий из них.
3. В чем заключается экологическая безопасность в производстве баллистических твердых ракетных топлив (БТРТ)?
4. В чем заключается экологическая безопасность в производстве смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ)?
5. В чем заключается электростатическая безопасность в производстве ЭНМ?

Библиографический список

1. *Волков Е.Б.* Ракетные двигатели / Е.Б. Волков. – М.: Воениздат, 1969. – 105 с.
2. *Паушкин Я.М.* Жидкие и твердые химические ракетные топлива / Я.М. Паушкин. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
3. *Цуцуран В.И.* Введение в технологию энергонасыщенных материалов / В.И. Цуцуран. – М.: Министерство обороны РФ, 2006. – 300 с.
4. *Аликин В.Н., Милехин Ю.М., Пак З.П.* Пороха, топлива, заряды. Т. 1. Методы математического моделирования для исследования зарядов твердого топлива / В.Н. Аликин, Ю.М. Милехин, З.П. Пак. – М.: Химия, 2003. – 216 с.
5. *Жегров Е.Ф., Милехин Ю.М., Берковская Е.В.* Химия и технология баллиститных порохов, твердых ракетных и специальных топлив. Т. 2. Технология / Е.Ф. Жегров, Ю.М. Милехин, Е.В. Берковская. – М.:РИЦ МГУП им. И. Федорова, 2011. – 551 с.
6. *Смирнов Л.А.* Оборудование для производства баллиститных порохов по шнековой технологии и заряды из них / Л.А. Смирнов. – М.: МГАХМ, 1997. – 192 с.
7. *Фиошина М.А., Русин Д.Л.* Основы химии и технологии твердых ракетных топлив: учебное пособие / М.А. Фиошина, Д.Л. Русин. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. – 316 с.
8. *Жигарев В.Г., Китаев Г.И.* Оборудование для переработки энергонасыщенных материалов в изделия: учебное пособие / В.Г. Жигарев, Г.И. Китаев. – М.: МГУИЭ, 2002. – 212 с.
9. *Гуров С.В.* Реактивные системы залпового огня: обзор, Изд.1. / С.В. Гуров. – Тула: Издательский дом «Пересвет», 2006. – 432 с.
10. *Смирнов Л.А., Калабухов Г.В.* Создание смесевых твердых топлив: История: Период поисков / Л.А. Смирнов, Г.В. Калабухов. – М.: МГАХМ, 1997. – 112 с.
11. *Генералов М.Б.* Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ: учеб. пособие для вузов / М.Б. Генералов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 397 с.
12. Основные процессы и аппараты пиротехнической технологии / В.П. Чулков [и др.]. – Сергиев Посад: Изд-во «Весь Сергиев Посад», 2009. – 528 с.
13. *Белкин И.М., Виноградов Г.В., Леонов А.И.* Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.

14. *Генералов М.Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: учеб. пособие для вузов / М.Б. Генералов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.

15. Моделирование формирования изделий из свободно литьевых композиций / *И.А. Глушков* [и др.]. – М.: Издательство «Архитектура-С», 2007. – 362 с.

16. *Шиманский В.А., Гаврилова Л.А.* Промышленное производство смесевых ракетных твердых топлив: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. - С.461-465.

17. Приближенный расчет рациональных параметров процесса перемешивания высоковязких композиций в смесителях планетарного типа / В.Г. Жигарев, О.В. Тиньков, Ю.Б. Банзула, В.А. Бобко. – Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 8. – С. 6–8.

18. *Жигарев В.Г.* Приближенный расчет технологических режимов перемешивания высоковязких композиций в смесителях барабанного типа / В.Г. Жигарев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 12. – С.6,7.

19. *Гаврилова Л.А., Клячкин Ю.С.* Заряды СТРТ, скрепленные с корпусом РДТТ: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С. 235–238.

20. *Гаврилова Л.А.* Методы бронирования вкладных зарядов ТРТ. Бронепокрытия для вкладных зарядов ТРТ: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С. 263–264, 69–70.

21. *Шимаров В.Ф.* Механические свойства ТРТ: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.273–277.

22. *Жиров С.Г., Юсуфов М.А., Порзов Б.В.* Теплофизические характеристики материалов РДТТ: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.528, 529.

23. *Соломонов Ю.С.* Ядерная вертикаль / Ю.С. Соломонов. – М.: ИД «Интервестник». 2010. – 334 с.
24. *Смирнов Л.А.* От «катюши» до «Тополя» / Л.А. Смирнов. – М.: МГУИЭ, 2008. – 180 с.
25. *Ключников А.Н., Венцкович И.Н., Эйхенвальд В.Н.* Ракета // Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.470-475.
26. Военно- энциклопедический словарь ракетных войск стратегического назначения / Мин-во обороны РФ; Гл. ред.: И.Д. Сергеев, В.Н. Яковлев, Н.Е. Соловцов и др. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 632 с.
27. *Шидловский А.А.* Основы пиротехники / А.А. Шидловский. – М.: Машиностроение, 1964. – 339 с.
28. *Мадякин Ф.П.* Компоненты и продукты сгорания пиротехнических составов / Ф.П. Мадякин. – Казань: Казанский государственный технологический университет, 2006. – 500с.
29. *Чевиков С.А.* Правила устройства: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.438-440.
30. *Гелашвили Н.В.* Производство твердых ракетных топлив. Автоматизация производства: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.440-443.
31. *Тарабара А.В.* Безопасность экологическая: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.59-60.
32. *Мелешко В.Ю.* Антропогенное воздействие энергетических конденсированных систем (ЭКС): Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.37,38.
33. *Михеев П.Н., Осавчук А.Н.* Безопасность электростатическая: Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С.60,61.
34. *Смирнов Л.А., Попов Ю.П., Китаев Г.И.* Требования техники безопасности при конструировании оборудования для ГАП пожаро- и взрывоопасных продуктов и изделий из них: учеб. пособие / Л.А. Смирнов, Ю.П. Попов, Г.И. Китаев. – М.: МИХМ., 1991. – 59 с.

Учебное издание

ГЕНЕРАЛОВ Михаил Борисович

**ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ
И АППАРАТЫ ПРОИЗВОДСТВА ТВЕРДЫХ
РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ**

ISBN 978-5-94099-113-7



Подп. в печ. 11.11.13. Форм. бум. 60x84 1/16

Объем 13,48 усл. п. л. Уч.-изд. л. 14,5

Тираж 50 экз. Зак. 34/2013

Издательство-полиграфический центр

107023, Москва, ул. Бол. Семеновская, д. 38