



«Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана
(национальный исследовательский университет)»
Кафедра «Ракетные двигатели»



Топлива и рабочие процессы в ЖРД

Твердые ракетные топлива.

Лекции 3, 4. Свойства топливной массы как полимера. Технология производства БТРТ

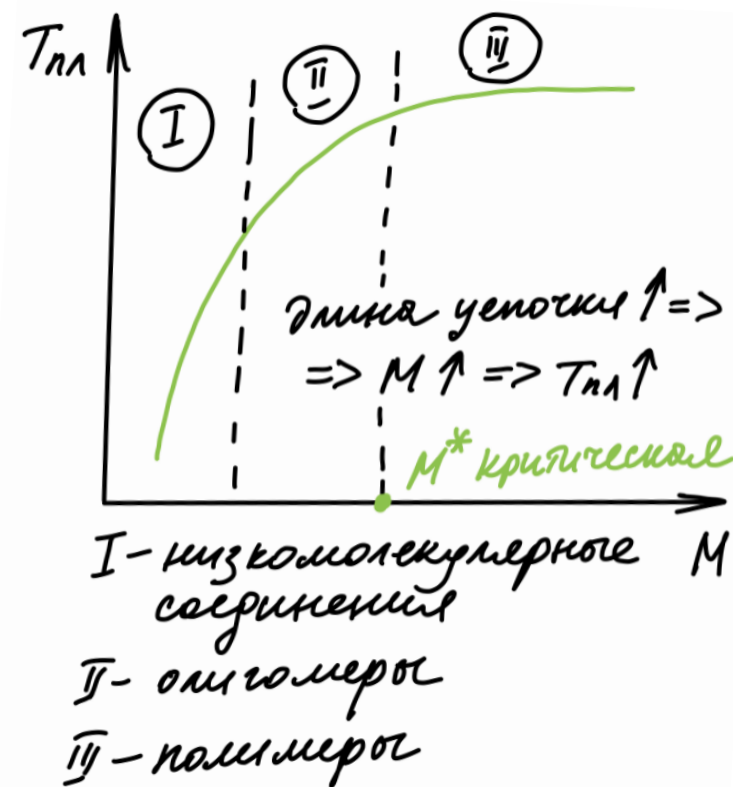
Твердые ракетные топлива - полимеры

Высокомолекулярной основой БТРТ и СТРТ являются различные по природе и свойствам полимеры.

Полимер — это вещество, состоящее из макромолекул, характеризующихся многократным повторением одного или более типов **составных звеньев**, соединенных между собой в количестве, достаточном для проявления **комплекса свойств**, которое остается практически неизменным при добавлении или удалении одного или нескольких составных звеньев.



составное звено полиэтилена



Твердые ракетные топлива - полимеры

Механические свойства и реологическое поведение топлив определяются **молекулярной и надмолекулярной структурой**, а также **фазовым** и **физическим состоянием** полимерной основы.

Молекулярная структура

Характеризуется:

- строением повторяющихся звеньев (гомоцепный, гетероцепный),
- структурой макромолекул (нерегулярные, регулярные, линейные, разветвленные, сшитые),
- средней молекулярной массой полимера.

Надмолекулярная структура

(уровень макромолекул)

Характеризуется характером укладки макромолекул в пространстве:

- аморфные
- кристаллические

Фазовые состояния полимеров:

- кристаллическое
- жидкое

Физические состояния полимеров:

- стеклообразное
- высокоэластическое
- вязко-текучее

Классификация полимеров

Конфигурация цепи (структура макромолекулы):

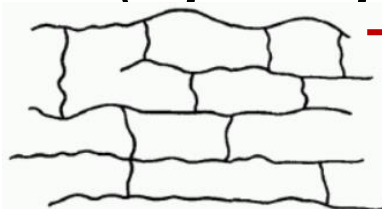
- **линейная** форма;



- **разветвленная** форма;



- **пространственная (трёхмерная или сшитая)** форма;



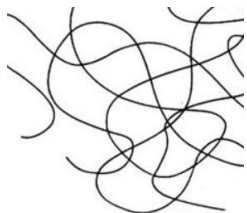
По техническим и технологическим признакам:

- **термопластичные** – способны к многократному плавлению и переработке (обратимое размягчение при нагреве) (ПЭ, ПВХ, полистирол);
- **термореактивные** – пространственно сшитые и не склонные к переработке (при нагреве необратимо превращаются в твердую прочную массу) (БК, эпоксидная смола);
- **эластомеры** – способны к эластичному восстановлению, пространственно сшитые и не склонные к переработке.

Классификация полимеров

Фазовое состояние полимеров:

- **аморфное** (характеризуется отсутствием упорядоченности в расположении молекул);

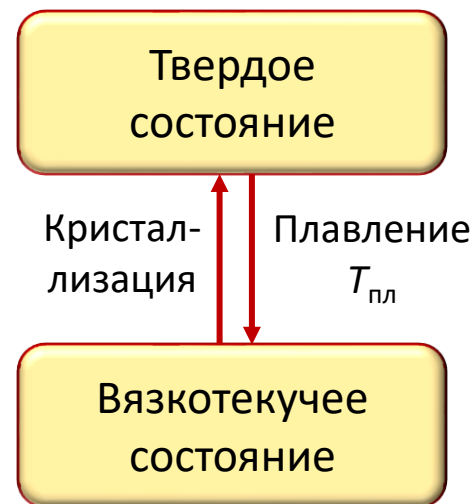


- **кристаллическое** (упорядоченное расположение некоторых отдельных участков цепных макромолекул).

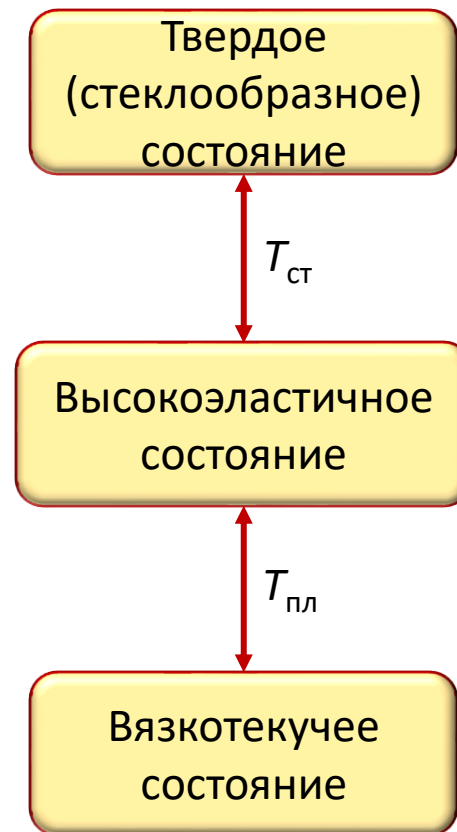


Физическое состояние полимеров:

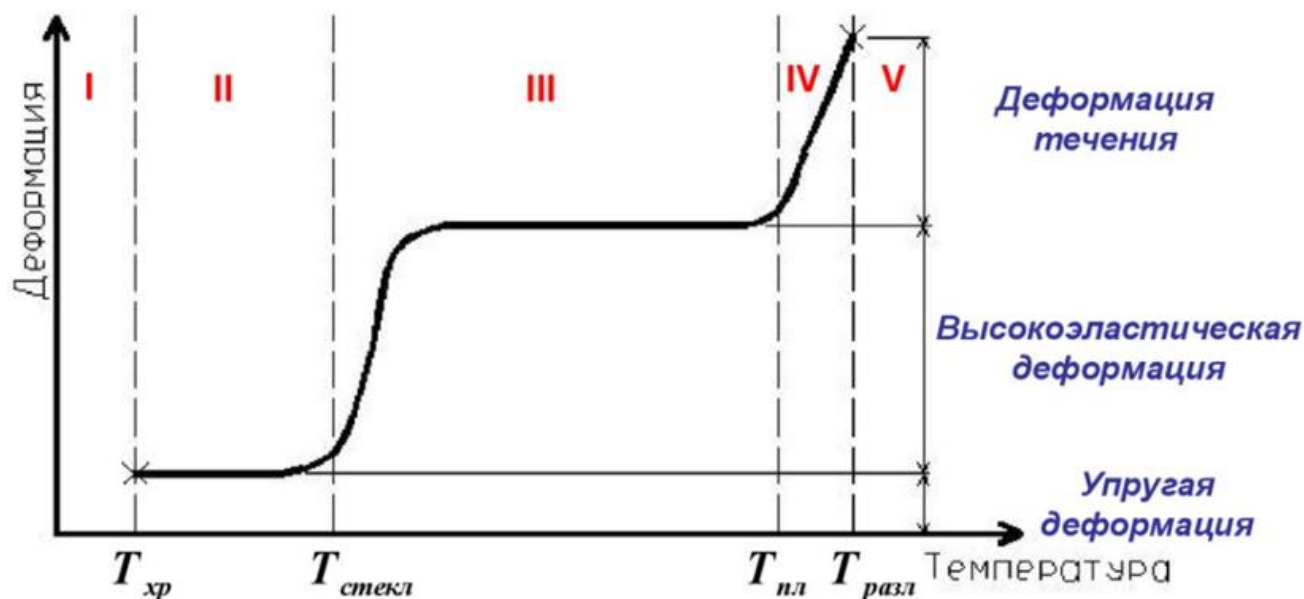
Кристаллический полимер



Аморфный полимер



Термомеханическая кривая

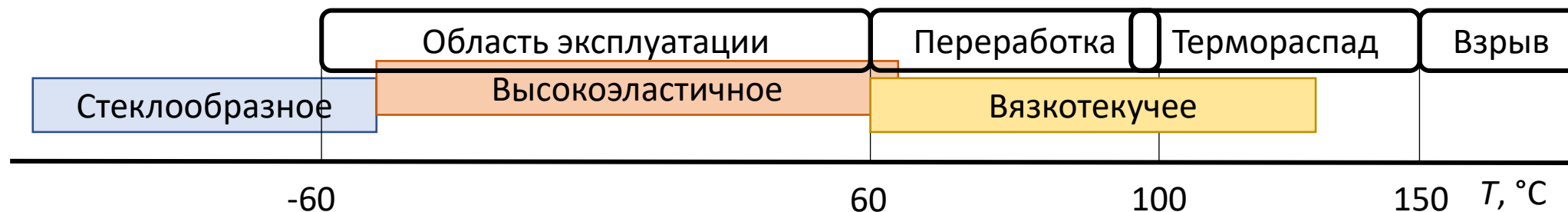


Три состояния линейного аморфного полимера

- I – хрупкость
- II – стеклообразное состояние
- III – высокоэластичное состояние
- IV – вязкотекучее состояние
- V – разложение (деструкция)

Сшитые полимеры **не** могут переходить в **вязкотекучее состояние** (химические сшивки препятствуют течению).

При нагреве выше температуры стеклования сшитые полимеры, находящиеся в высокоэластичном состоянии, разрушаются.



Неньютоновские жидкости

В случае ньютоновского течения вдоль оси x **динамический коэффициент вязкости** определяется *законом внутреннего трения Ньютона*:

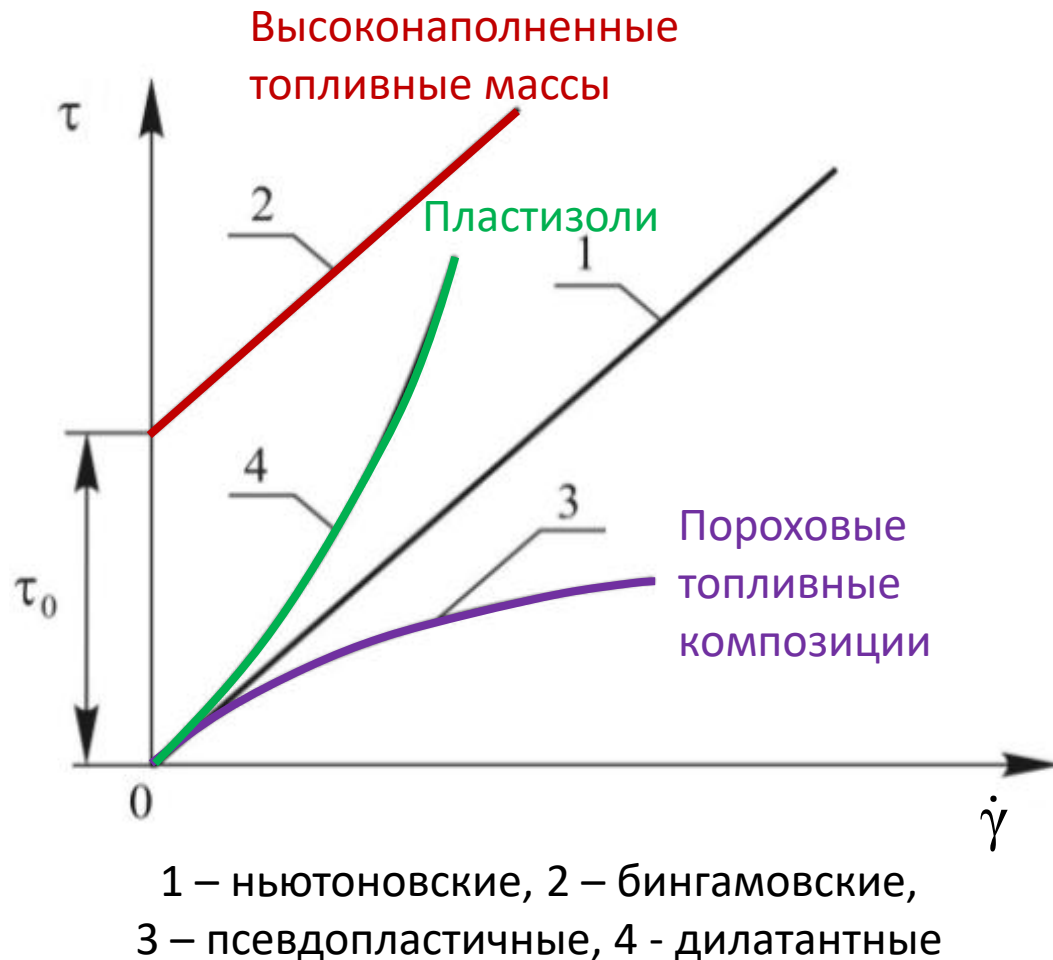
$$\tau = -(\pm)\mu \frac{dv_x}{dy} = \mu \dot{\gamma}; \quad [\tau] = \left[\frac{\text{кг}(\text{м}/\text{с}^2)}{\text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{кг}(\text{м}/\text{с})}{\text{м}^2/\text{с}} \right].$$

Реология (наука о течении) – наука обо всех аспектах деформирования реальных сплошных сред под влиянием приложенных напряжений.

Жидкости, обнаруживающие **зависимость коэффициента вязкости от скорости сдвига**, называются **неньютоновскими**. Неньютоновские жидкости в зависимости от их свойств, разделяют на три группы:

- 1) **реологически стационарные жидкости** – скорость сдвига в данной точке зависит только от напряжения в этой точке (бингамовские, псевдопластичные, дилатантные);
- 2) **реологически нестационарные жидкости** – скорость сдвига зависит от продолжительности действия напряжения (тиксотропные, реопектические);
- 3) **вязкоупругие жидкости** – сочетание свойств твердого тела и жидкости, проявляющееся в виде упругого восстановления формы после снятия напряжения.

Неньютоновские жидкости



Закон Бэлкли-Гершеля-Освальда де Виля является эмпирическим выражением зависимости касательного напряжения от градиента скорости сдвига, которая связана с временами релаксации межмолекулярных сил полимеров.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$$

Динамический коэффициент вязкости для полимеров:

$$\eta = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = nK\dot{\gamma}^{n-1}$$

Основные требования, предъявляемые к рациональному способу производства

- Непрерывность, автоматизированность, высокопроизводительность и обеспечение заданного высокого уровня и однообразия эксплуатационных характеристик изделий
- Безопасность (зависит от состава и реологических характеристик)
- Наличие быстрого, эффективного контроля с минимальным участием человека (или полным его исключением)
- Универсальность (возможность изготовления изделий различных форм, размеров и массы одинаковыми приёмами и при использовании одинакового оборудования)
- Кратковременность и гибкость производственного цикла
- Массовость, низкая стоимость, экологическая чистота и безотходность

Основные требования, предъявляемые к топливным массам

- Высокая степень однородности
- Необходимый комплекс реологических характеристик, позволяющий перерабатывать топливные массы в изделия необходимых форм и размеров при относительно невысоких температурах (20...80°C)
- Относительно низкая чувствительность к механическим и другим импульсам для обеспечения безопасности получения и переработки
- Необходимая «живучесть» массы, содержащей полимеризационные и вулканизирующие компоненты (сохранение на исходном уровне реологических свойств в период получения и переработки)

Производство БТРТ. Способы переработки пороховых масс баллистического типа

- **Прходное прессование**
- **Метод рулонирования** (намотки)

Намотка вальцованного порохового полотна со склейкой по слоям

- **Штамповка**

Термоформование: плоские заготовки из термопластичных материалов нагреваются до температуры стеклования, затем воздействуют давлением

Холодное формование: листовая заготовка, при комнатной температуре или на 20-40 градусов ниже $T_{ст}$, формуется специальным пуансоном

- **Метод фильтрации** (насыщения)

Основные этапы технологического процесса производства БТРТ методом проходного прессования

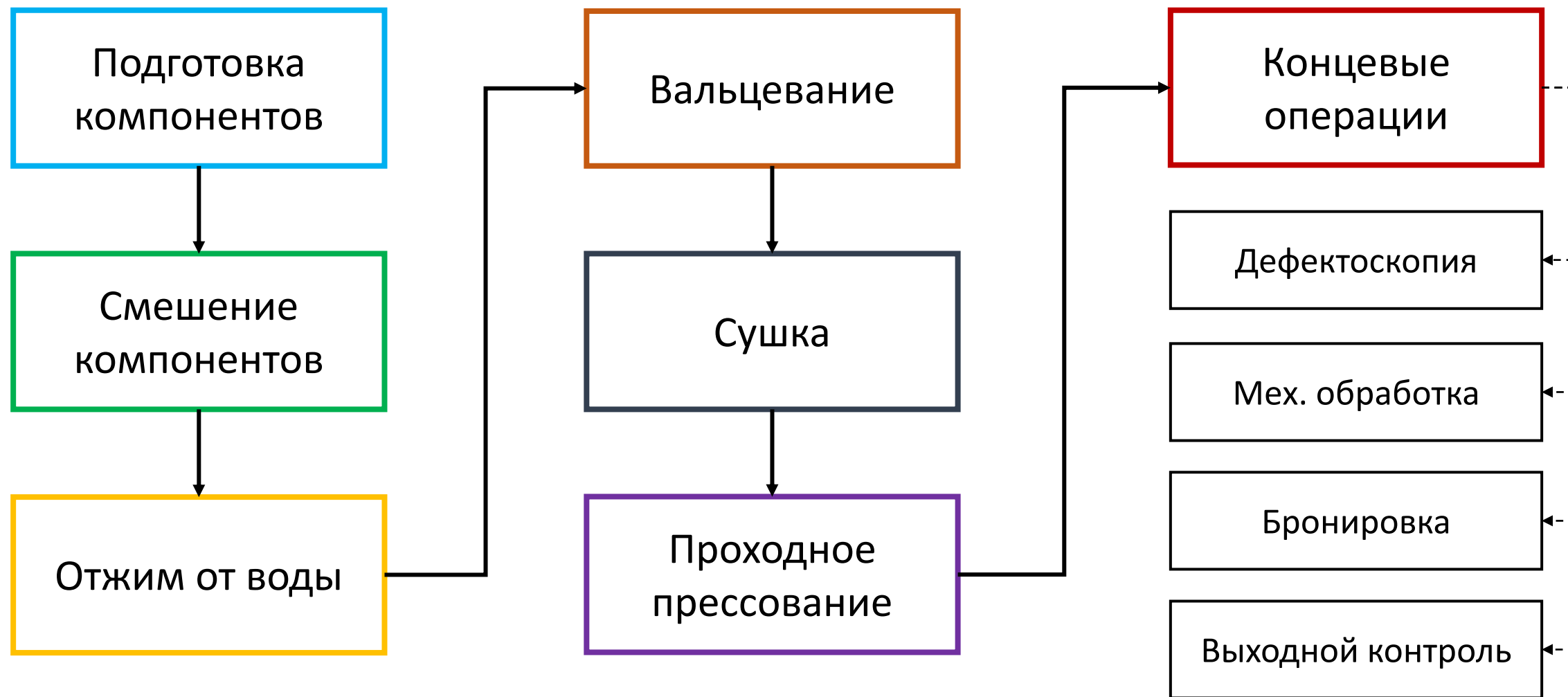
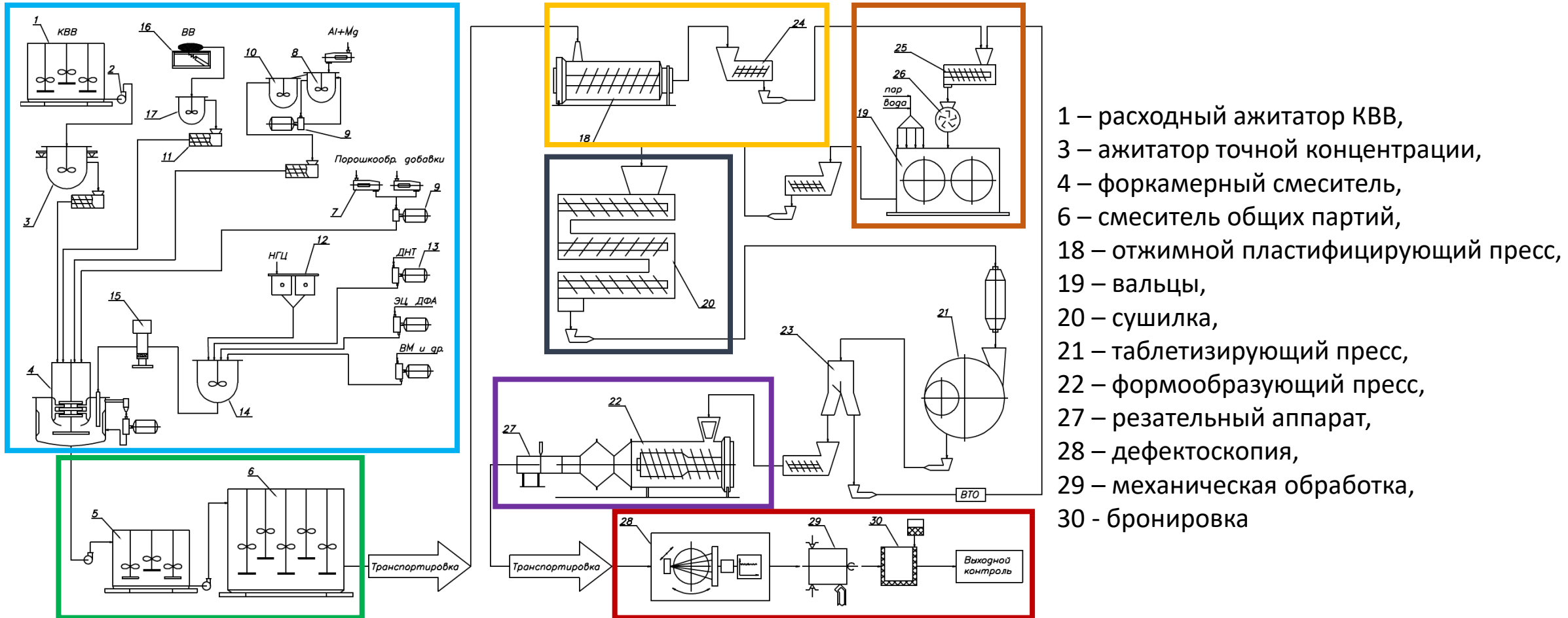


Схема технологического процесса производства БТРТ



Подготовка и дозирование компонентов

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 (централиты, ДФА).

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

Гидрофобизация – это образование на поверхности частиц пленки вещества, которая не смачивается водой (порошки магния и алюминия).

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

Подготовка и дозирование компонентов

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 катализаторов горения)

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

Дозирование порошков:

- Объёмные тарельчатые дозаторы
- Весовые дозаторы

Дозирование эмульсий и суспензий:

- Объёмно-импульсные дозаторы
- Винтовые насосы

Смешение компонентов топлива

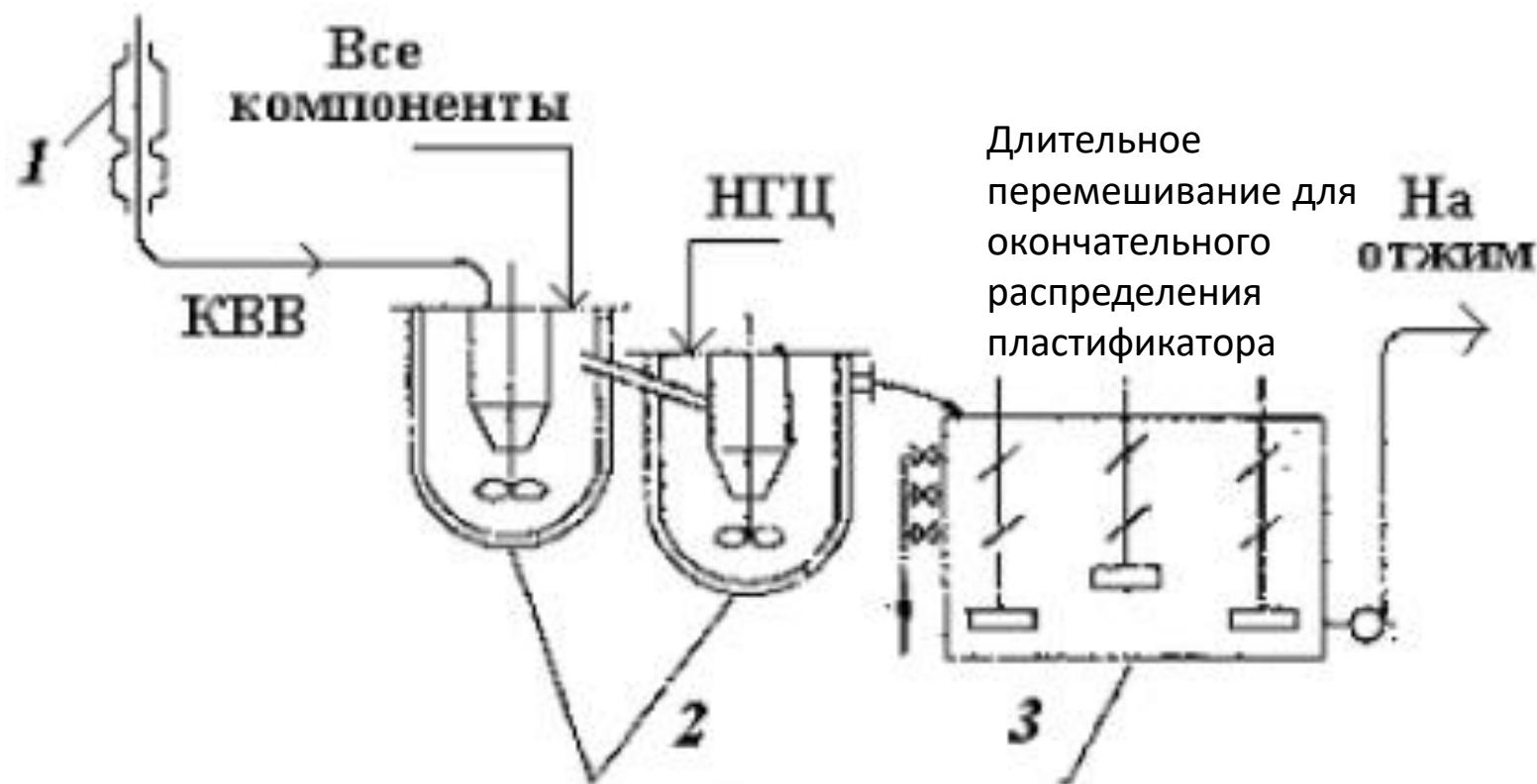
*Основу изготовления баллистических топлив составляет процесс **пластификации** НЦ энергетическим пластификатором, как правило, НГЦ.*

Пластификация – это 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.

Вода:

- способствует равномерному распределению НГЦ по объёму волокон НЦ
- помогает НГЦ проникать в наиболее узкие капилляры, облегчает пластификацию
- обеспечивает безопасность процесса смешения компонентов
- **препятствует окончательному и глубинному процессу пластификации**

Смешение компонентов топлива

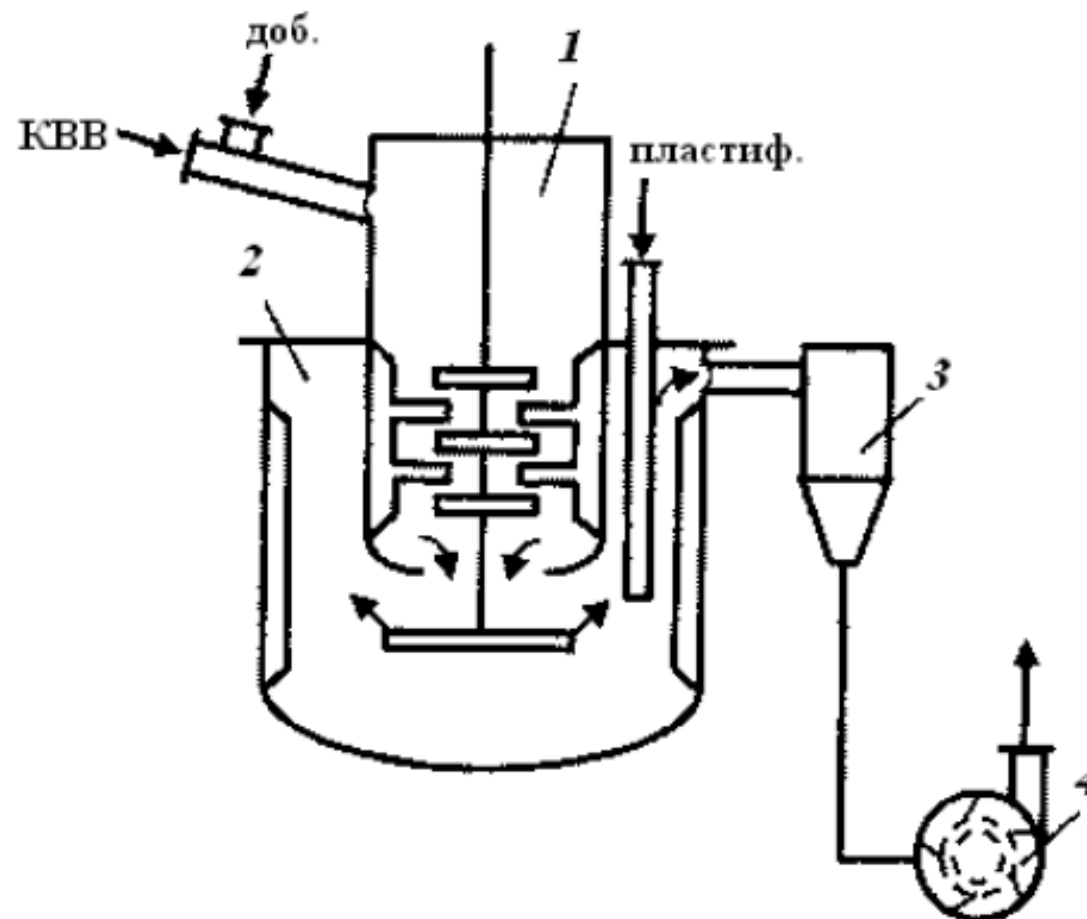


1 – объёмно-импульсный дозатор КВВ; 2 – реакторы ёмкостного типа (с рубашкой обогрева), которые соединены переливной трубой; 3 – смеситель общих партий

Смешение компонентов топлива

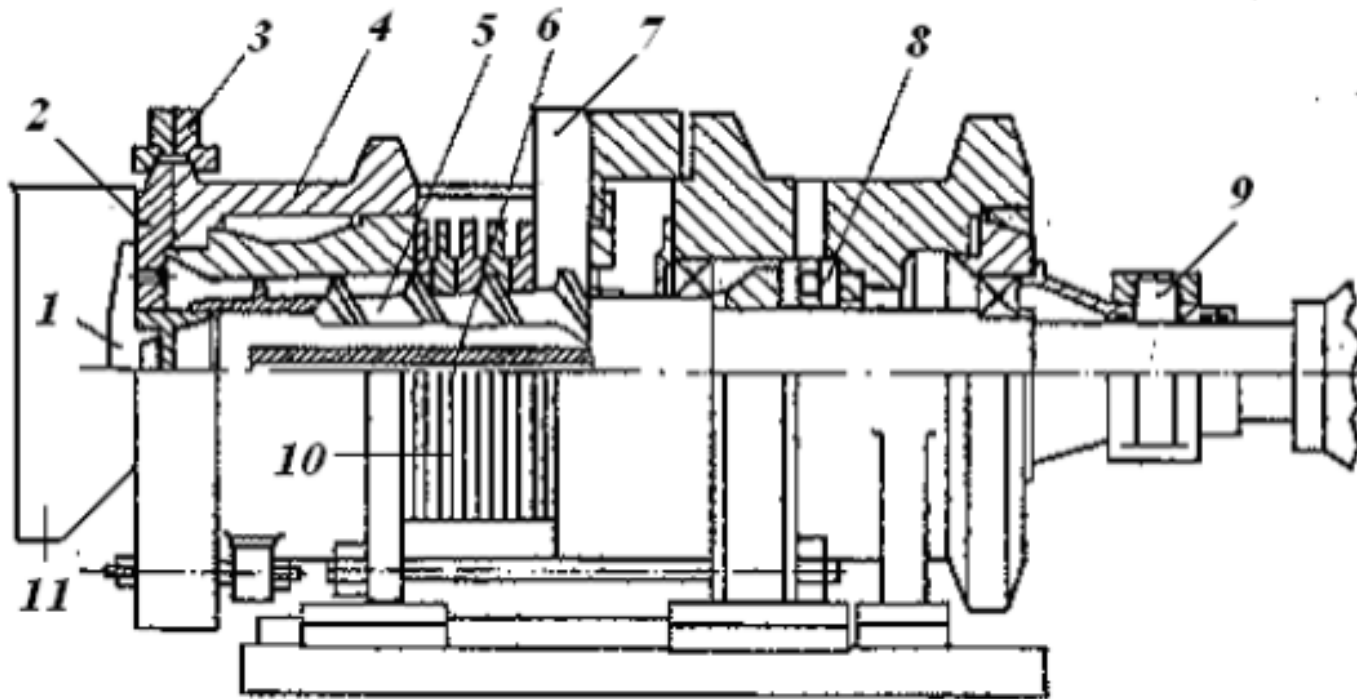
Повышение эффективности процесса пластификации НЦ и ускорения каждой из составляющих стадий этого процесса: смачивания, капиллярной пропитки и диффузии достигается при перемешивании компонентов в режиме гидродинамической кавитации.

- 1 – форсмесительная камера,
- 2 – камера усреднения,
- 3 – переливное устройство,
- 4 – гидродинамический смеситель-насос



Удаление воды на отжимных шнековых прессах

После приготовления топливной массы ее водную суспензию направляют на отжим воды при 30–60°C, который осуществляют в отжимном прессе



Воду удаляют механическим путем за счет возникающего перепада давления от 1,0 до 10,0 МПа

Фильтрация влаги в противоположном направлении движения твердой фазы

В результате влажность топливной массы снижается до 6–8 %, мас.

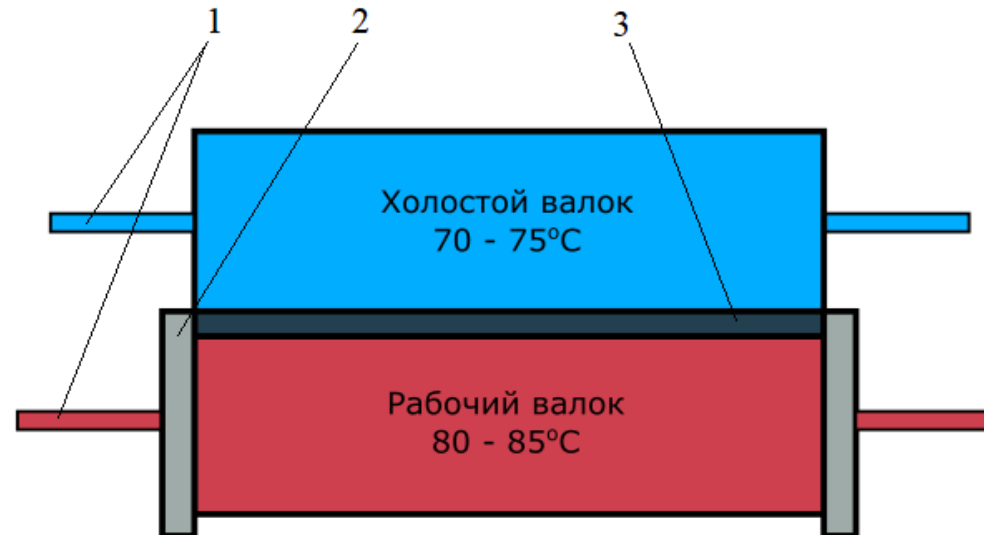
1 – нож, 2 – фильера, 3 – разъёмное фланцевое соединение, 4 – корпус, 5 – шнек, 6 – центральная труба системы обогрева, 7 – загрузочное окно, 8 – опорный подшипниковый узел, 9 – букса для подачи горячей воды, 10 – фильтрующее устройство, 11 – вакуумная камера

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.



1 – полый вал для подачи горячей воды; 2 – формирующее кольцо; 3 – пороховой «чулок»

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**.

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 .

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

Сушка

Окончательное досушивание баллистического 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.

Общая характеристика процессов при проходном шнековании

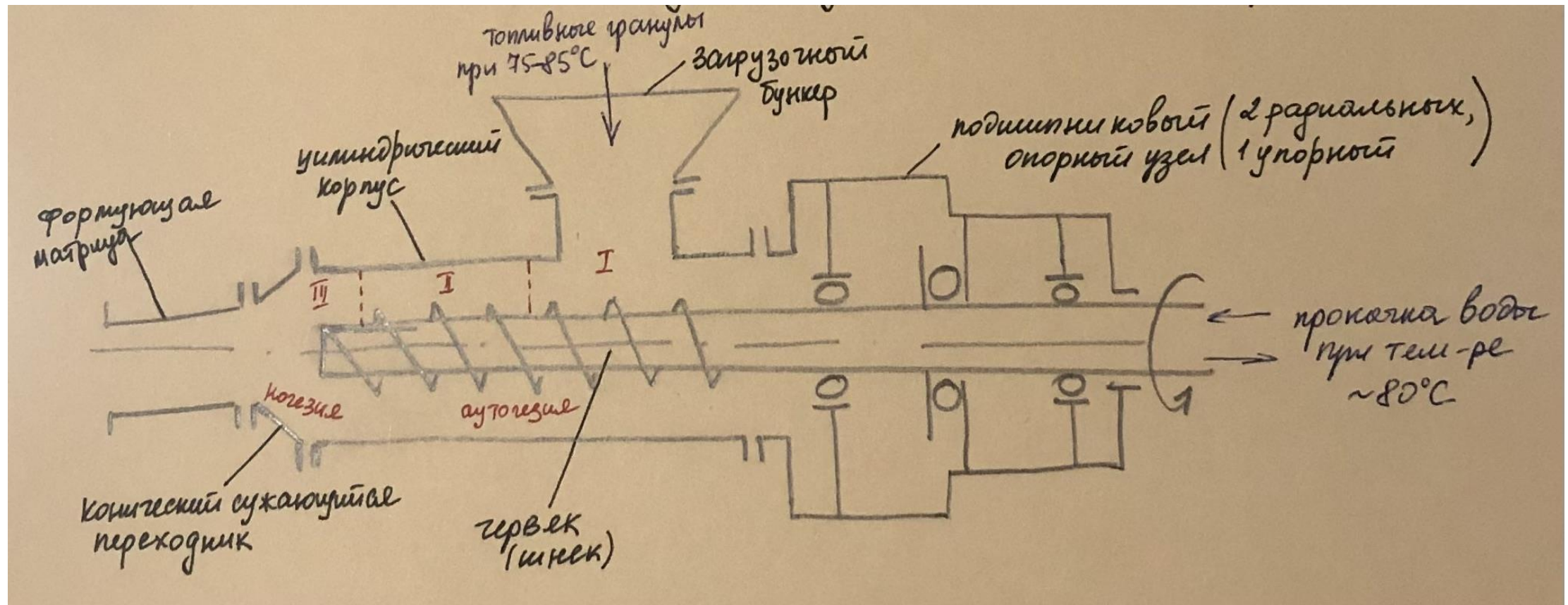
Аутогезия – всестороннее сжатие термопластичных таблеток баллиститного топлива при повышенной температуре.

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

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.

Проходное прессование (формообразование)



I – зона питания (загрузочная), II – зона сжатия (переходная), III – дозирующая зона (формующая, зона течения)

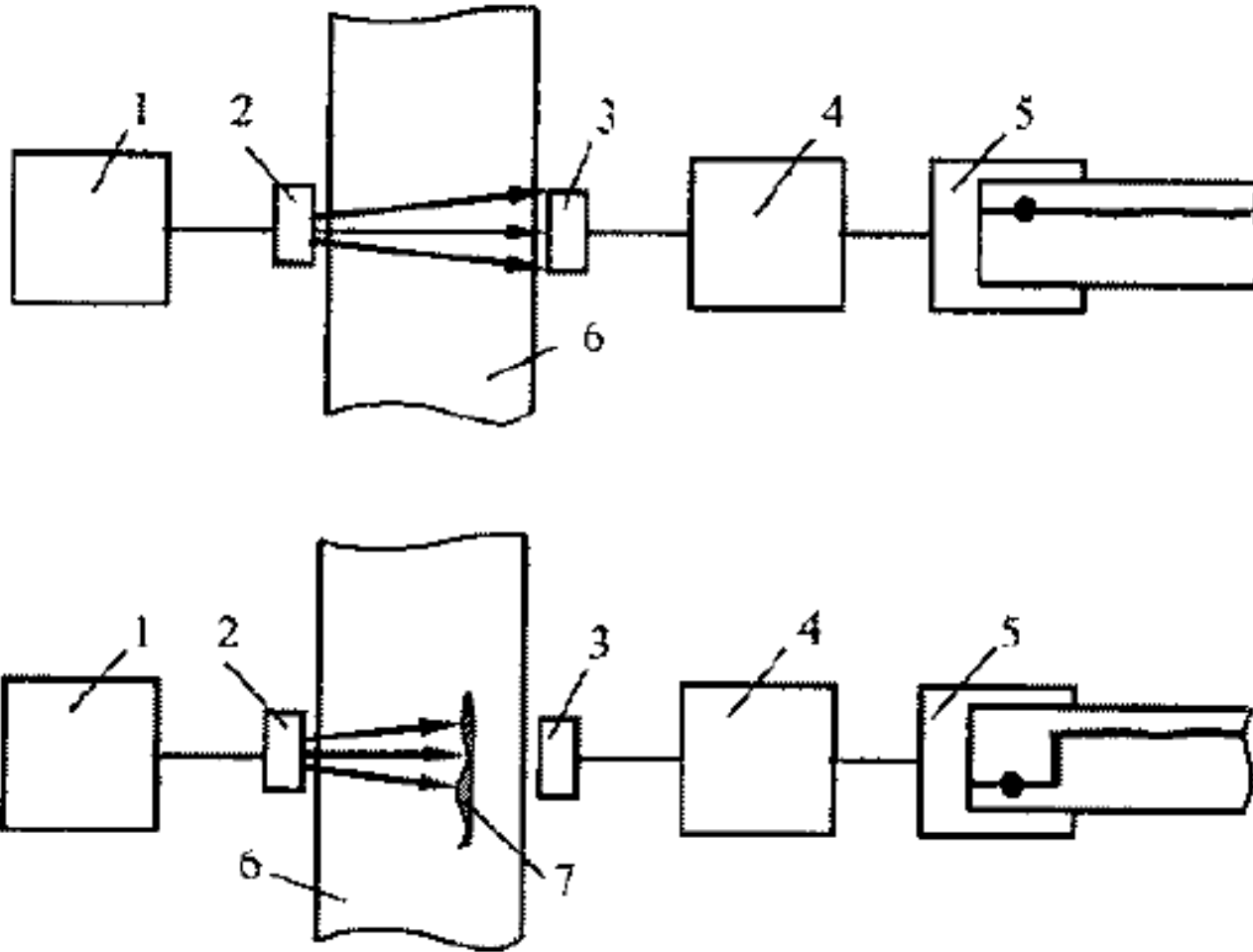
Дефектоскопия изделий

Основные технологические операции при дефектоскопии шашек-заготовок из БТРТ:

- Визуальный осмотр
- Теневая ультразвуковая дефектоскопия
- Радиационный контроль (гамма-спектроскопия, радиографический метод)
- Рентгеновская дефектоскопия

Интроскопический неразрушающий контроль для обнаружения дефектов в виде посторонних включений, трещин, разнотности и других в изделиях БТРТ, как правило, осуществляют методом теневой ультразвуковой дефектоскопии.

Дефектоскопия изделий



1 – генератор
ультразвуковой аппаратуры,
2 – излучающий
преобразователь,
3 – приемный
преобразователь,
4 – приемник
ультразвуковой аппаратуры,
5 – регистрирующее
устройство,
6 – изделие,
7 - дефект

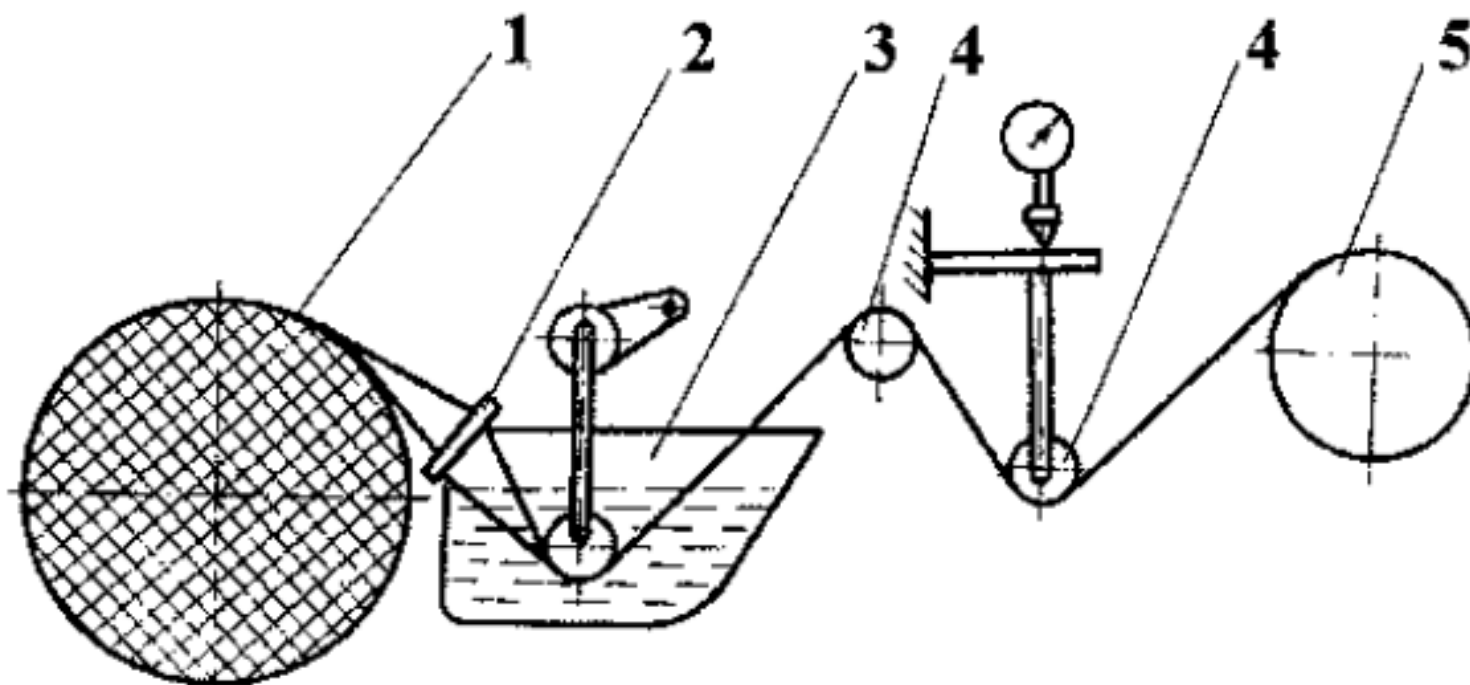
Бронирование изделий

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.

Требования к бронепокровкам:

- 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;
- широкая отечественная сырьевая база и низкая стоимость

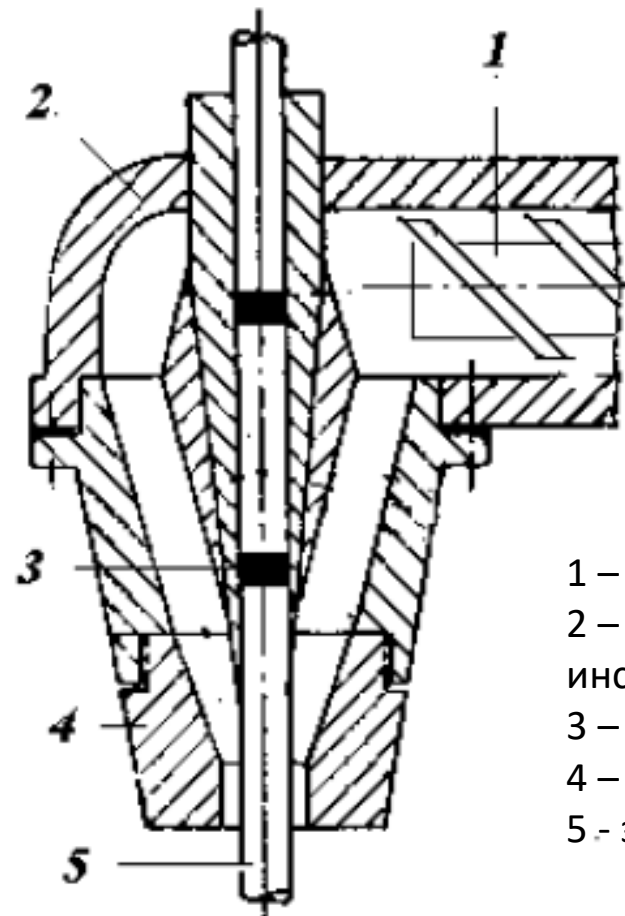
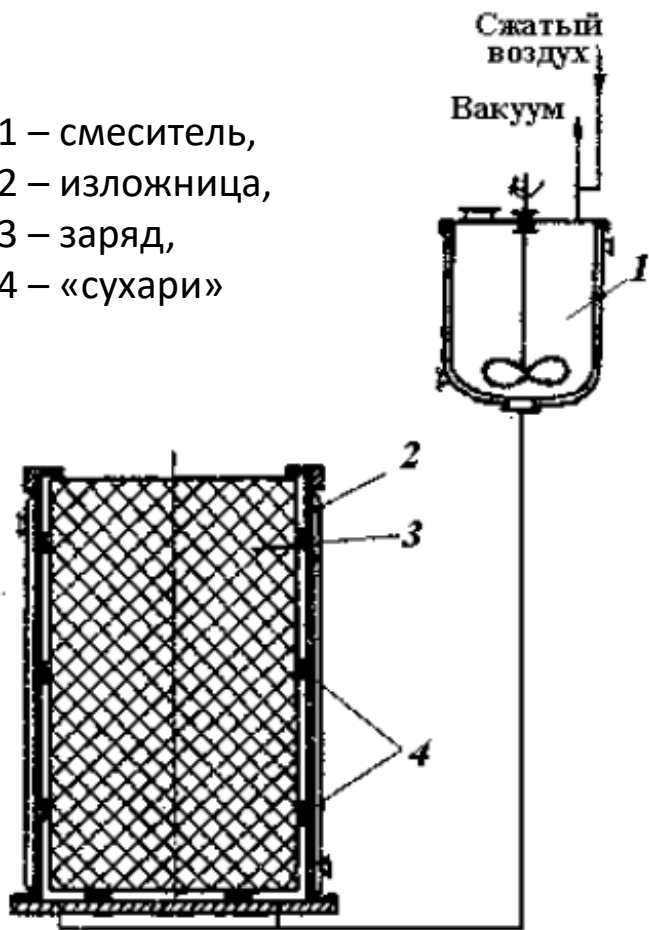
Бронирование методом намотки



1 – заряд, 2 – фильера, 3 – ванная с бронесоставом, 4 – натяжные ролики, 5 - барабан

Бронирование методом заливки и экструзии

- 1 – смеситель,
- 2 – изложница,
- 3 – заряд,
- 4 – «сухари»



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