



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



# Топлива и рабочие процессы в ЖРД

**Твердые ракетные топлива.**

***Лекции 5, 6.*** Технология производства СТРТ

# Основные технологические фазы получения СТРТ

Принципиальная схема основных технологических фаз производства смесового твердого ракетного топлива включает в себя:

## 1. Подготовка компонентов:

- Окислитель и негорючие порошки
- ГСВ и горючие компоненты

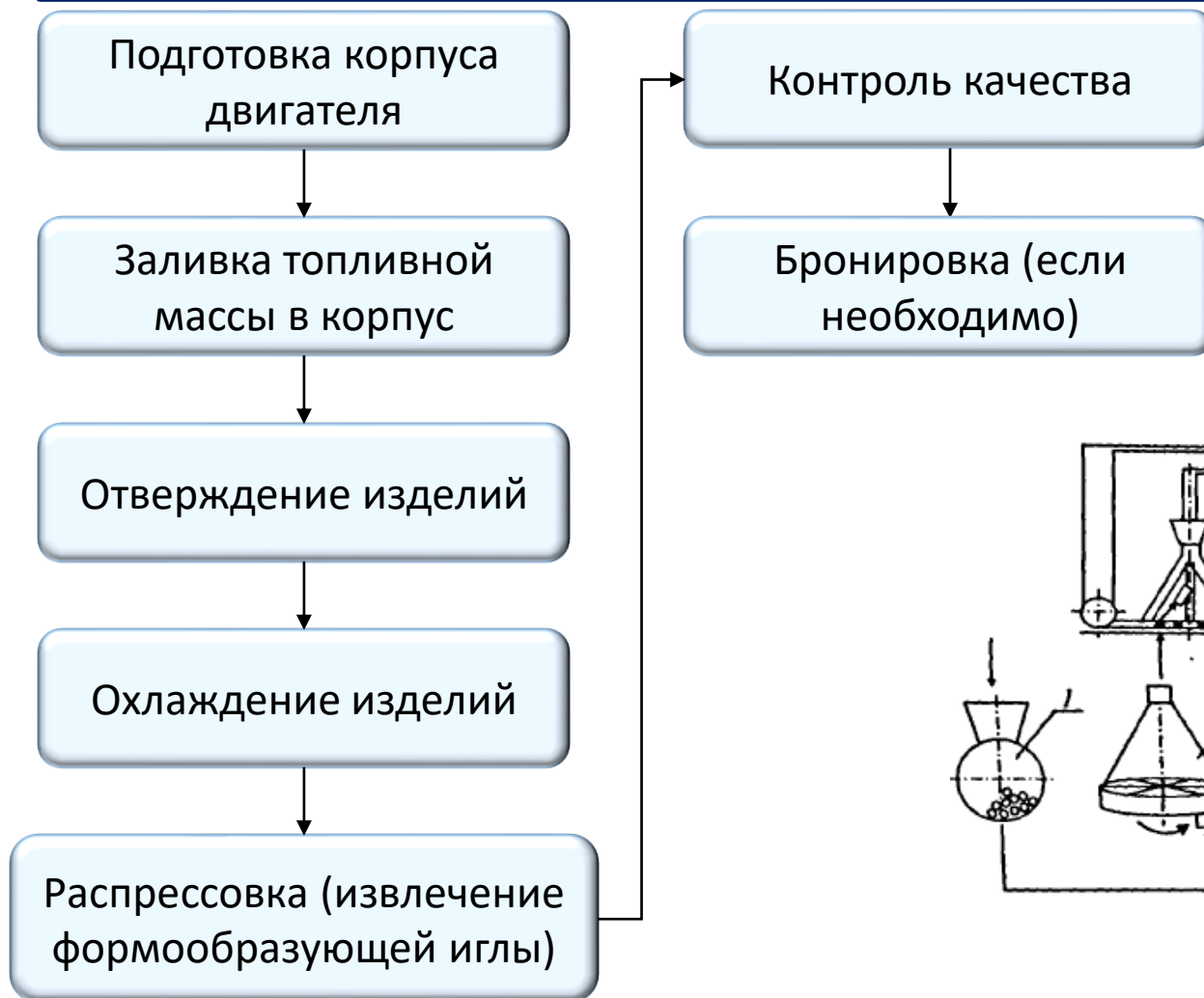
## 2. Получение топливной массы:

- Смешение компонентов
- Ввод в смесь отвердителя

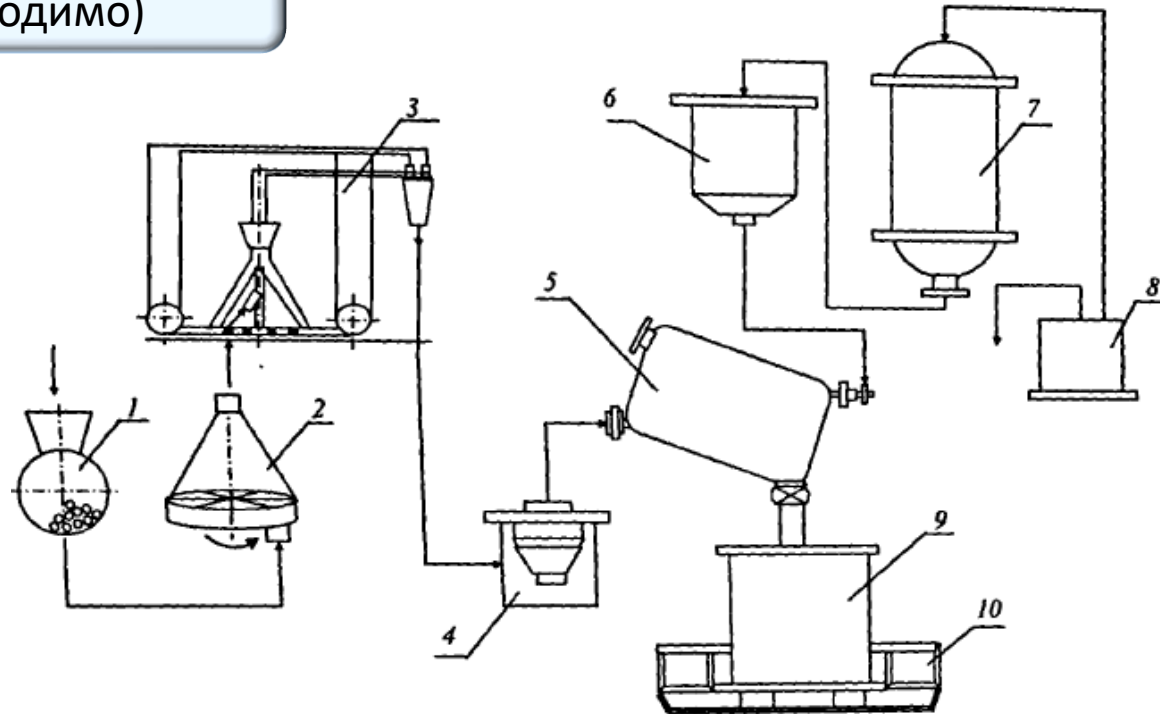
## 3. Формование ракетных зарядов:

- Метод свободного литья
- Метод литья под давлением
- Проходное прессование

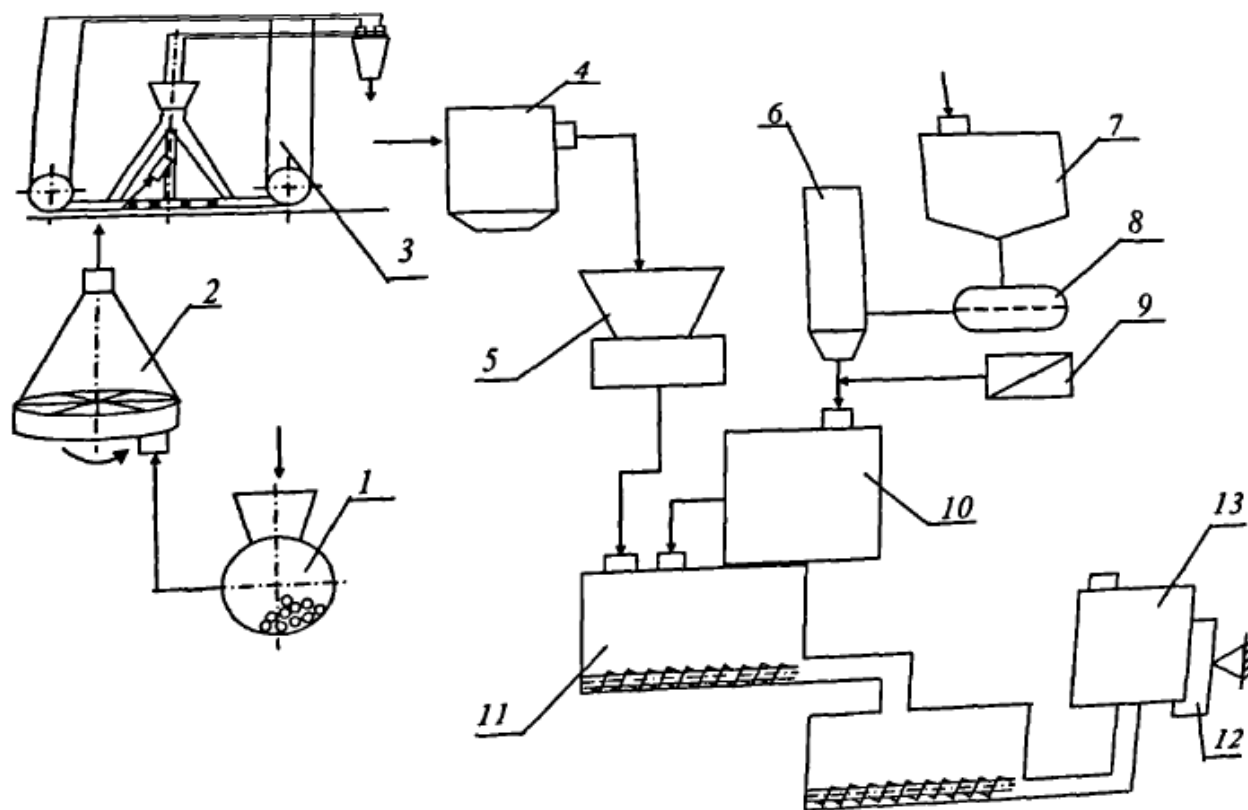
# Метод свободного литья



1 - дробильно-протирочный аппарат, 2 - сушилка с кипящим слоем, 3 - струйно-вентиляционная установка, 4 - контейнер окислителя, 5 - смеситель, 6 - мерник связующего, 7 - реактор жидко-вязких компонентов, 8 - ёмкость для алюминия, 9 - изложница, 10 - транспортная платформа

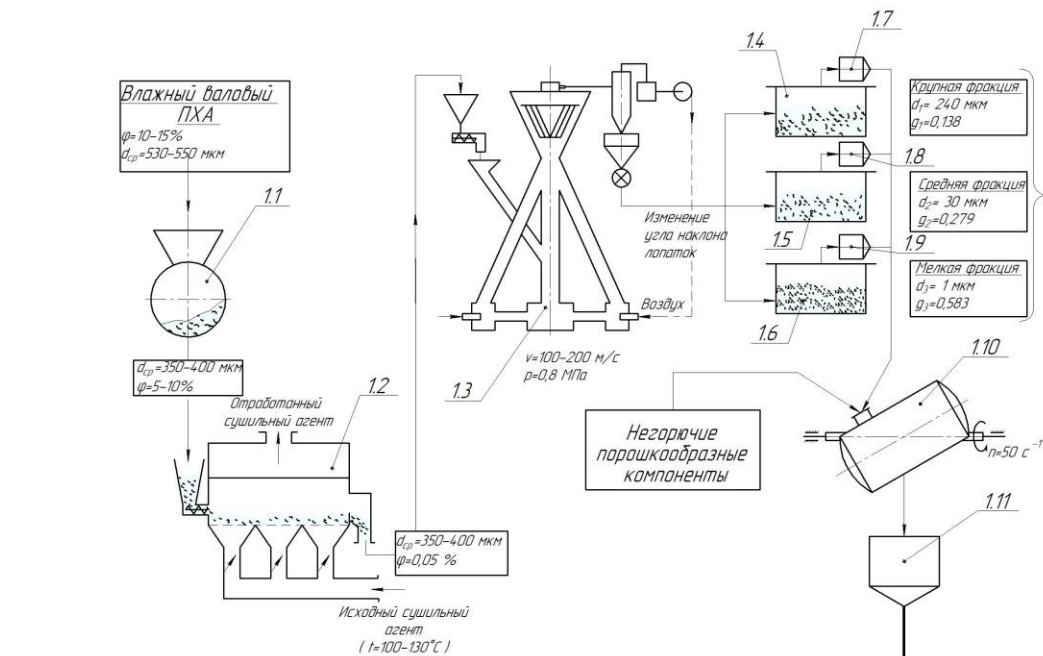


# Метод литья под давлением



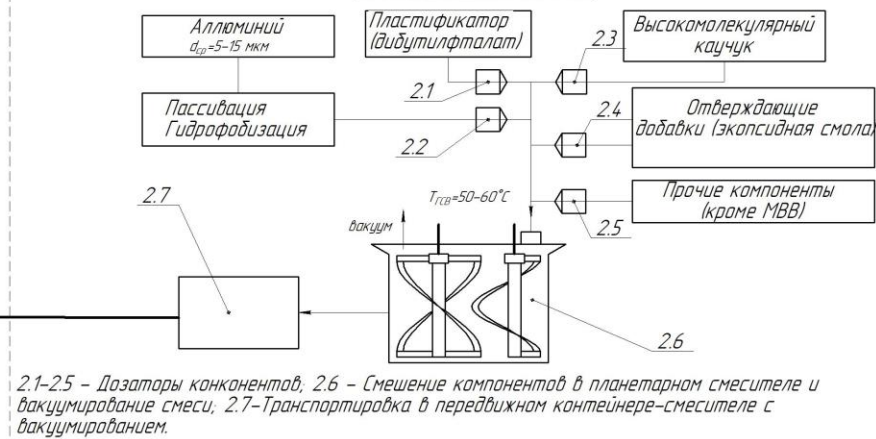
1. Дробильно-протирочный аппарат
2. Сушилка с кипящим слоем
3. Струйно-вентиляционная установка
4. Ёмкость порошкообразных компонентов
5. Дозатор сыпучих компонентов
6. Импульсный дозатор
7. Реактор
8. Фильтр
9. Дозатор связующего
10. Форсмеситель
11. Установка СНД
12. Опора
13. Пресс-форма

## 1. Подготовка окислителя



1.1-Измельчение ПХА в дробильно-протирочном аппарате; 1.2-Сушка в сушилке с псевдожидким слоем; 1.3-Измельчение в струйной мельнице; 1.4-1.6 - Накопительные емкости рабочих фаз ПХА; 1.7-1.9 - Дозаторы рабочих фаз ПХА; 1.10-Смешение компонентов в аппарате типа "пьяная точка"; 1.11-Дозирование смеси.

## 2. Подготовка ГСВ

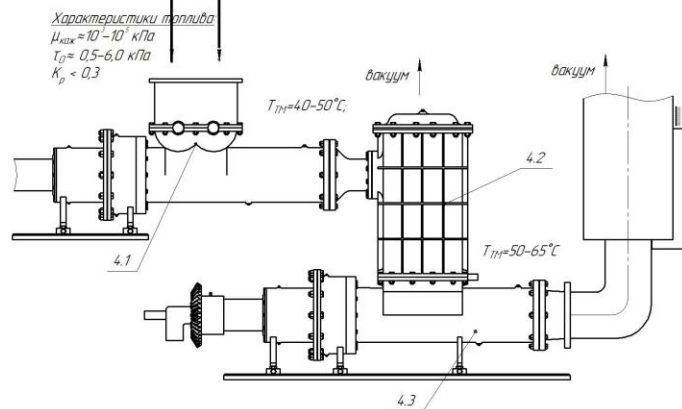


## 3. Подготовка корпуса двигателя и технологической оснастки



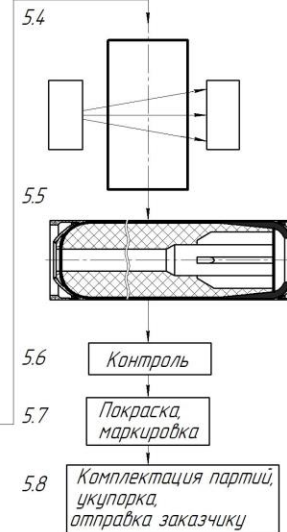
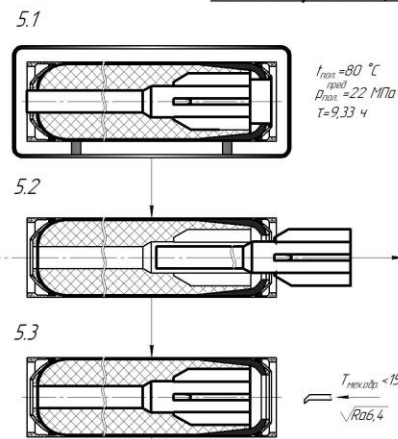
3.1-Очистка, обезжиривание внутренней поверхности корпуса, наклеивание ТЭП, нанесение ЗКС; 3.2-Установка и закрепление углы с антиадгезионным наружным покрытием, обработка антиадгезионным покрытием элементов оснастки, контактирующих с топливной массой.

## 4. Формование ТМ методом литья под давлением



4.1-Первичное смешивание компонентов; 4.2-Вакуумирование в вакуумной камере; 4.3-Нагнетание топливной массы в корпус с помощью напорного шнека.

## 5. Завершающие операции



5.1-Полимеризация и охлаждение заряда в камере; 5.2-Распределение технологической оснастки; 5.3-Механическая обработка заряда и контроль размеров; 5.4-Рентген-контроль; 5.5- Бронировка торца заряда; 5.6 - Контроль размеров и качества бронепокртытия; 5.7 - Покраска, маркировка заряда; 5.8 - Комплектация партий, укупорка, отправка заказчику

# Подготовка окислителя (ПХА)

К гранулометрическому составу и влажности ПХА предъявляют повышенные требования, поскольку они оказывают существенное влияние на технологические свойства топливной массы, процессы её отверждения, скорость горения и физико-механические характеристики готовых изделий.

На **стадии подготовки** ПХА проводят следующие **технологические операции**:

1. Измельчение окислителя

2. Сушка

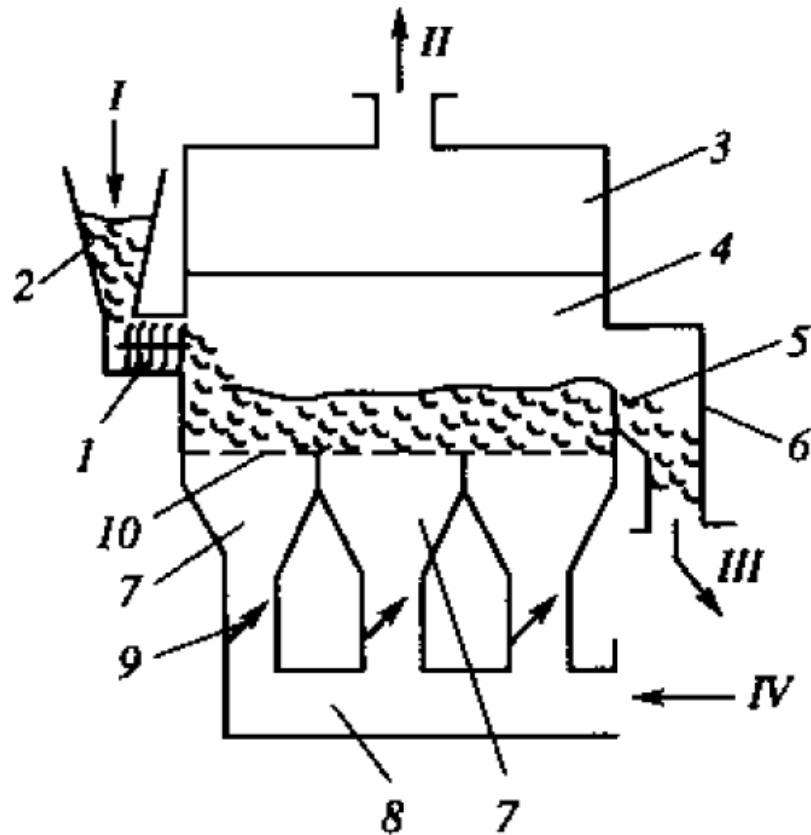
3. Классификация на фракции с разными диапазонами размера частиц

4. Смешение отдельных фракций и получение готовой смеси порошков ПХА

5. Смешение ПХА с негорючими порошками добавочных компонентов и получение рабочей смеси порошков (РСП)

# Подготовка окислителя (ПХА)

Из дробильно-протирочного аппарата ПХА с влажностью 5-10% системой транспортёров подаётся в сушильный агрегат. Чаще всего используют **сушилки с псевдооживленным слоем** (влажность на выходе из аппарата 0,05%)



- I – исходный твёрдый материал
- II – отработанный сушильный агент (горячий воздух)
- III – высушенный материал
- IV – исходный сушильный агент (горячий воздух 100-130°C)
- 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

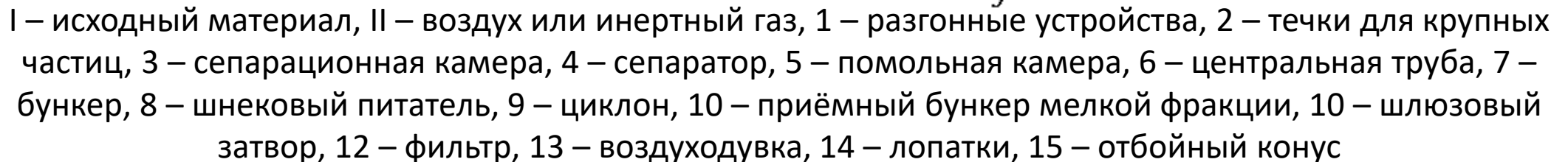
# Подготовка окислителя (ПХА)

- Высушенный ПХА поступает на **операцию классификации** – это процесс разделения сыпучего материала по крупности частиц.
- Для ПХА используют чаще всего **грохочение** (просеивание материала 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 транспортёров поступают в накопительную ёмкость.
- 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.

**Недостатки:** большие удельными  
энергозатраты, а также требуют установки  
после себя громоздкой системы  
пылеулавливания.



# Транспортировка ПХА с одной фазы на другую

Является ответственной операцией, для которой применяют:

- Напорный пневмотранспорт (перемещает ПХА по трубам с помощью сжатого воздуха)
- Всасывающий пневмотранспорт (перемещает ПХА по трубам за счет разрежения, которое обеспечивается вакуумным насосом, расположенным в конце установки)
- Шнековые транспортёры
- Спиральные транспортёры
- Передвижные контейнеры
- Вибротранспортёры

# Приготовление рабочей смеси порошков (РСП)

- Сферические частицы одинакового размера практически можно уложить с остаточной **порозностью**  $\varepsilon = 0,42 - 0,38$  независимо от их диаметра. **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.

$$D_м \leq \left( \frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) D_к = 0,154 D_к$$

$$\frac{D_к}{D_м} \geq 7$$

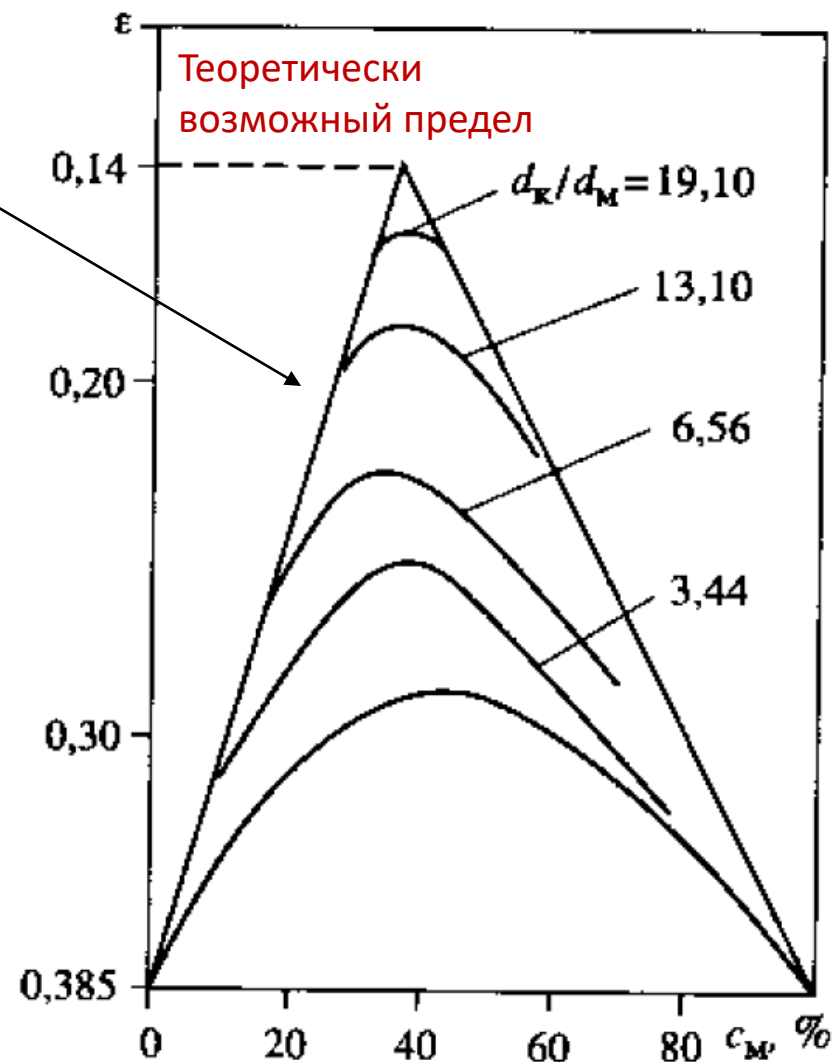
# Приготовление рабочей смеси порошков (РСП)

Зависимости порозности слоя  $\varepsilon$  укладки сферических частиц двухкомпонентной смеси от массовой концентрации мелкой фракции в смеси  $C_M$  при различных значениях отношения  $D_K/D_M$ .

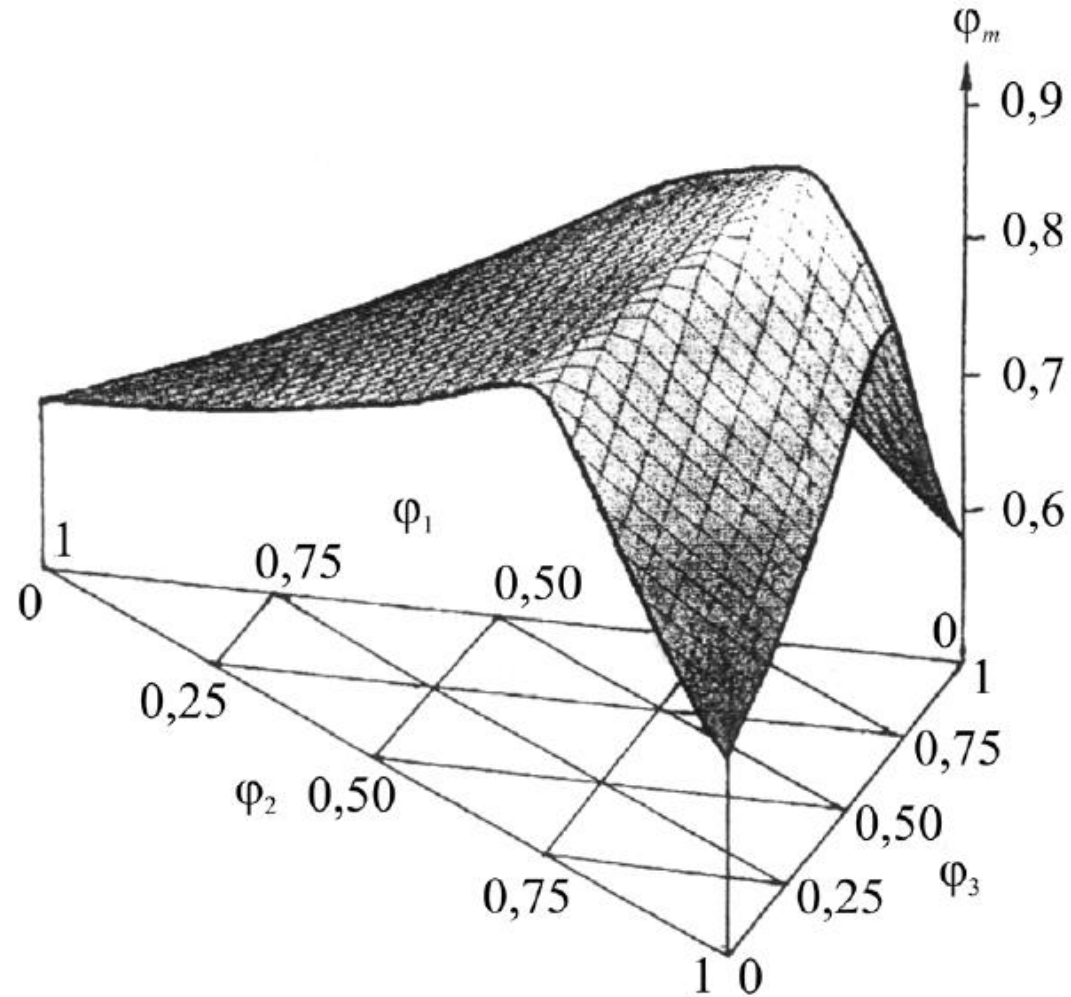
Порозность укладки возрастает при увеличении отношения  $D_K/D_M$ .

С учетом максимальной массовой концентрации твердой фазы в слое, оптимальное массовое содержание мелкой фракции в смеси лежит в пределах 25–40 %; с увеличением отношения  $D_K/D_M$  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  $\varepsilon = 0,10$ .



# Зависимость предельной степени объёмного наполнения СТРТ от объёмных долей трёх фракций



# Приготовление рабочей смеси порошков (РСП)

- 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.**

Если большая частица с диаметром 250 мкм, то меньшая фракция 0,0025-0,025 мкм!

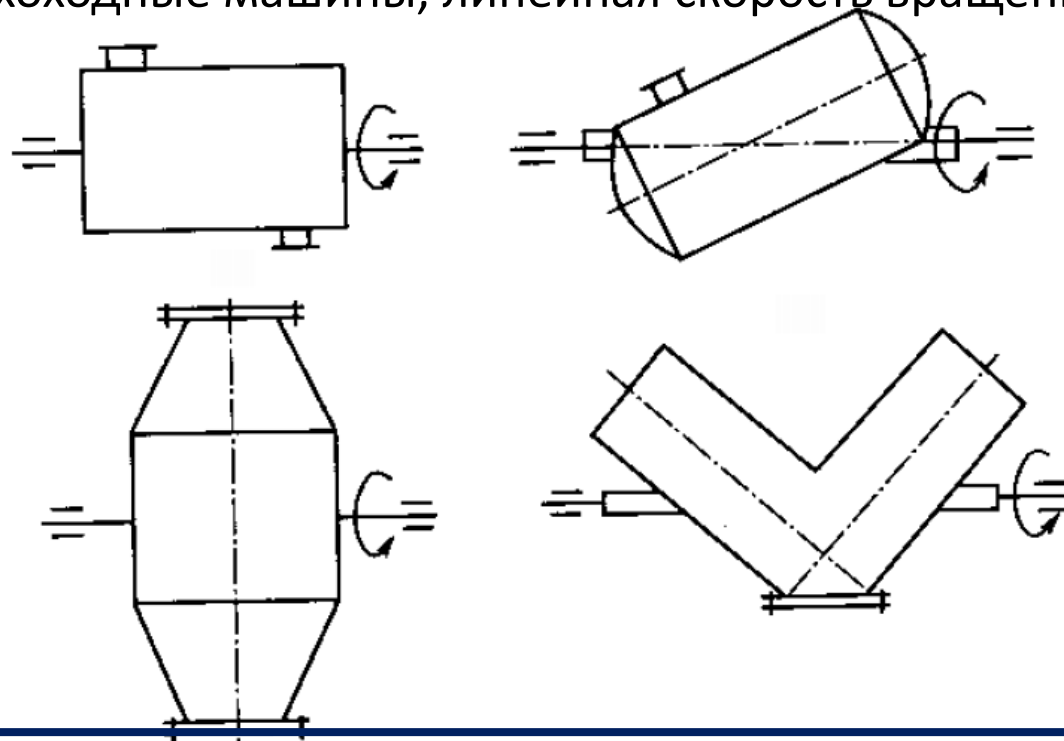
- Большинство используемых в промышленности порошков имеет частицы несферической формы и они не могут уплотняться по механизму вибропросеивания (виброфльтрации).

При виброфльтрации 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).

- В многофракционных системах из несферических частиц применяют **метод предварительного смешивания исходных фракций.**

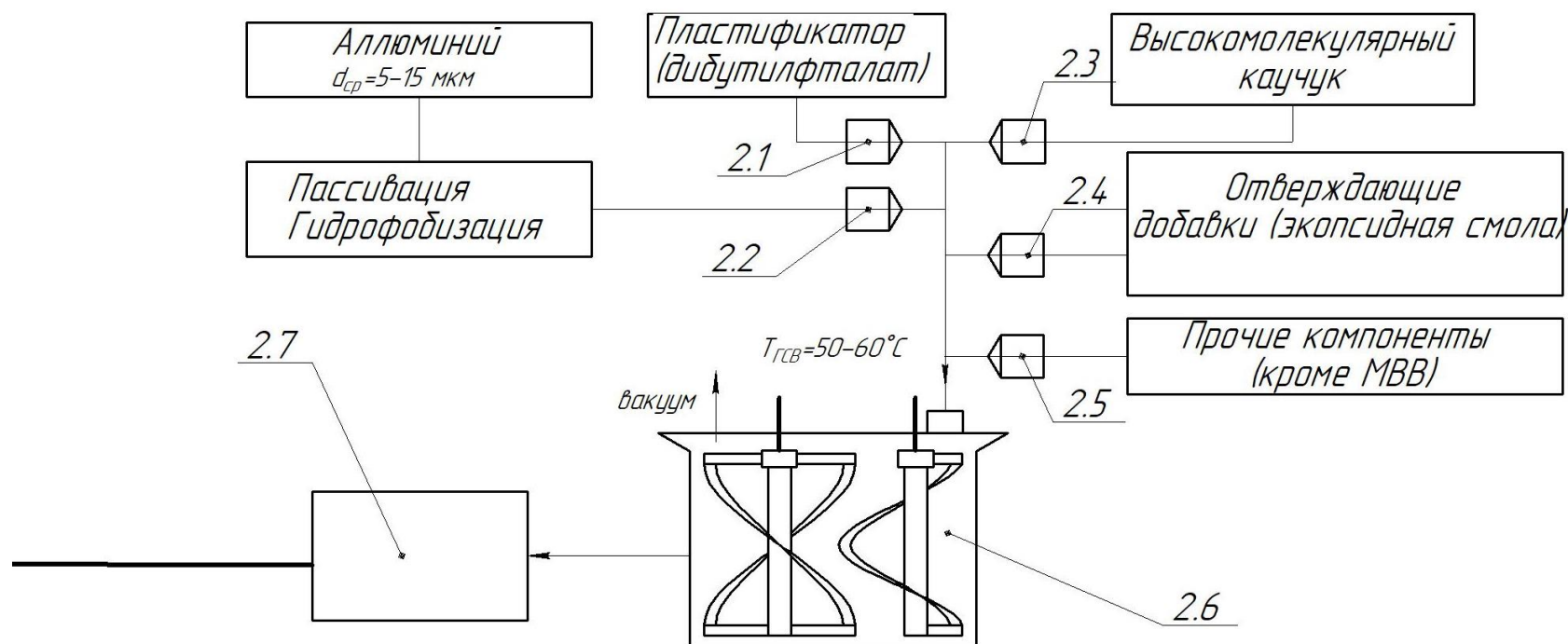
# Приготовление рабочей смеси порошков (РСП)

- 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 в смесителях периодического действия барабанного типа (тихоходные машины, линейная скорость вращения 0,17-1 м/с).



# Приготовление ГСВ

## 2. Подготовка ГСВ



2.1-2.5 – Дозаторы компонентов; 2.6 – Смешение компонентов в планетарном смесителе и вакуумирование смеси; 2.7 – Транспортировка в передвижном контейнере-смесителе с вакуумированием.

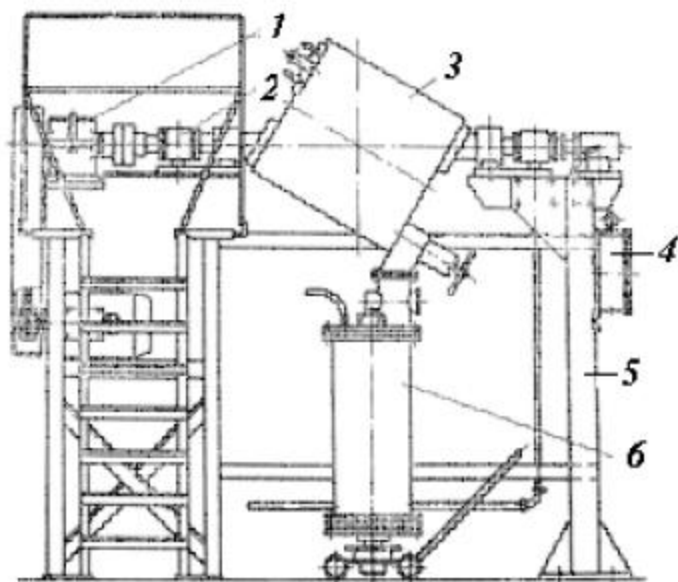


# Приготовление ГСВ

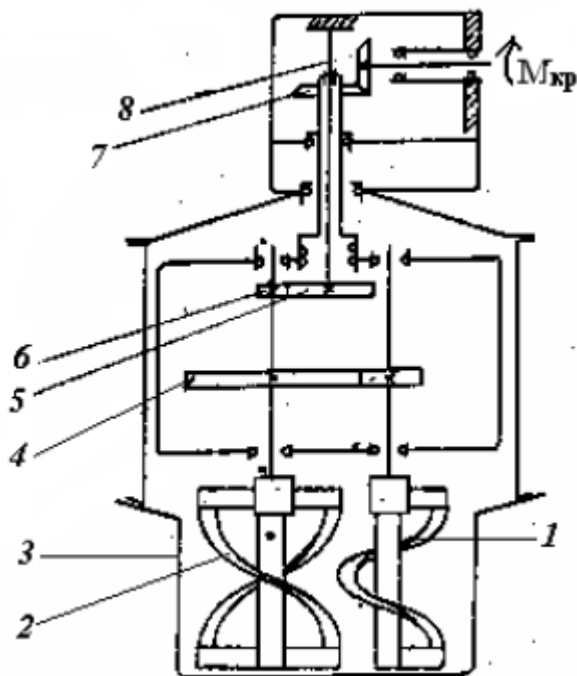
Назначение этой технологической фазы производства СТРТ заключается в смешении полимерной основы (например, каучука) с пластификатором, порошкообразным алюминием (или другими металлическими частицами), отверждающими добавками и другими компонентами (за исключением мощных ВВ: гексогена и октогена); при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

- Для приготовления низковязких ГСВ также используют объемные смесители типа «пьяная бочка»
- Для ГСВ средней вязкости используют планетарные цилиндрические смесители периодического действия с рубашкой для подогрева (которая нужна для снижения вязкости смеси) и вакуумированием (для исключения попадания в смесь газовых включений)
- Для высоковязких связующих применяют двухвальные смесители с нижним выгрузным шнеком

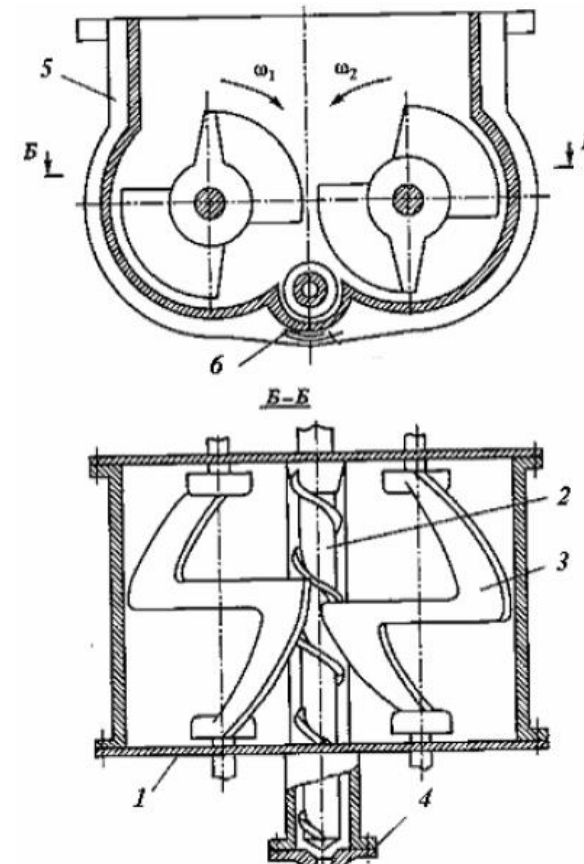
# Приготовление ГСВ



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



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



1 – камера смешения, 2 – шнек, 3 – ротор, 4 – фильера, 5 – стенка

# Физико-химические процессы при смешении компонентов ТРТ

- Смачивание твердых частиц наполнителя жидкими компонентами с вытеснением воздуха с их поверхности и 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

# Физико-химические процессы при смешении компонентов ТРТ

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 (зависят от кажущейся вязкости неньютоновской жидкости).

Хорошо известно, что *температура оказывает значительное влияние на реологические свойства полимерных систем - при ее увеличении величина кажущейся вязкости снижается:*

$$\mu_{\text{каж}} = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

# Физико-химические процессы при смешении компонентов ТРТ

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.

# Физико-химические процессы при смешении компонентов ТРТ

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.

Если *доля твердой фазы* в смеси достаточно *велика*, то тонкие адсорбционно-сольватные оболочки соприкасаются и возникает сплошная структурная сетка, и *реологические свойства резко ухудшаются*.

*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 вязкость 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.

# Критерии оценки качества смеси

Большинство методов оценки однородности (или качества) смеси основаны на **методах статистического анализа**.

Для упрощения расчетов все смеси условно считаются двухкомпонентными, состоящими из **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 смеси*)

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.

# Критерии оценки качества смеси

В качестве критерия оценки однородности смеси наиболее часто используют **коэффициент вариации (неоднородности)**:

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

Среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех пробах

Количество проб

Концентрация ключевого компонента в i-й пробе смеси

С увеличением  $V_c$  **неравномерность распределения компонентов в смеси возрастает!**

Если величина содержания ключевого компонента в смеси подчиняется нормальному закону распределения, то можно оценить **доверительную вероятность**  $\alpha$ :

$$P\left[\left(\bar{c} - \Delta c\right) < c_{\text{ист}} < \left(\bar{c} + \Delta c\right)\right] = \alpha = 0,9 \dots 0,95$$

Точность оценки, где  $\sigma_c$  - статистическое среднеквадратическое отклонение,  $t_c$  - коэффициент Стьюдента (зависит от  $n$ )

$$\Delta c = \frac{\sigma_c t_c}{\sqrt{n}}, \quad \sigma_c = \sqrt{\frac{\sum (c_i - \bar{c})^2}{n-1}}$$



# Критерии оценки качества смеси

В ряде случаев при экспериментальных исследованиях необходимо определить **минимальный объем выборки** (число опытов)  $n$ , который с заданной точностью  $\Delta c$  и доверительной вероятностью позволит найти искомую величину.

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

Относительная точность измерений

$n$	Значения $t_c$ при $\alpha$				$n$	Значения $t_c$ при $\alpha$			
	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	$\infty$	1,65	1,96	2,33	2,58

Если значения  $\sigma_c$  и  $V_c$  неизвестны, то их определяют по результатам предварительных исследований.

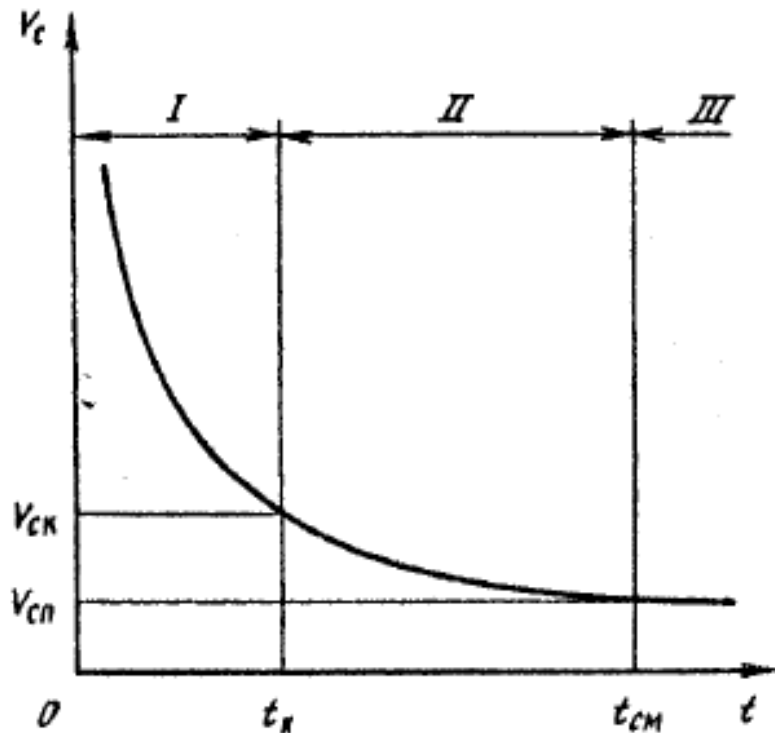
Для смесей высокой однородности  $V_c < 2 \%$

Хорошего качества  $2 \% < V_c < 5 \%$

Низкого качества  $5 \% < V_c < 8 \%$

# 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**.



## I. Преобладает процесс смешения над сегрегацией

За счёт уменьшения агрегатов из одинаковых частиц и конвективного переноса их по внутреннему объёму смесителя происходит резкое снижение коэффициента неоднородности

## II. Скорости процессов смешения и сегрегации соизмеримы

Процесс смешения реализуется в основном за счет перемещения и перераспределения отдельных частиц относительно друг друга (диффузионное смешение)

## III. Скорости элементарного процесса смешения (конвективное и диффузионное) и сегрегации равны

В момент оптимального времени смешения  $t_{см}$  коэффициент  $V_c$  становится постоянной величиной

# Подготовка корпуса двигателя и оснастки

Подготовка формообразующей оснастки (иглы) заключается в очистке и обезжиривании её поверхностей, контактирующих с топливной массой, а также в нанесении на них антиадгезионного покрытия (несколько слоёв фторопласта).

Для обеспечения прочного скрепления заряда с корпусом двигателя на очищенную внутреннюю поверхность последнего предварительно наносится промежуточный слой, который одновременно является бронепокрытием для заряда и **защитно-крепящим слоем** (ЗКС), *обеспечивающим прочное скрепление зарядов с корпусом ракетного двигателя (РД) в процессе эксплуатации в заданном интервале температур, а также защищает корпус от воздействия высокотемпературных потоков продуктов сгорания топлива.*

ЗКС представляет собой двухслойный материал, состоящий из резины и асболавсановой или капроновой ткани. Этот материал приклеивается к внутренней поверхности корпуса, а затем наносится крепящий состав который предназначен для обеспечения адгезионного шва между топливом и ЗКС.

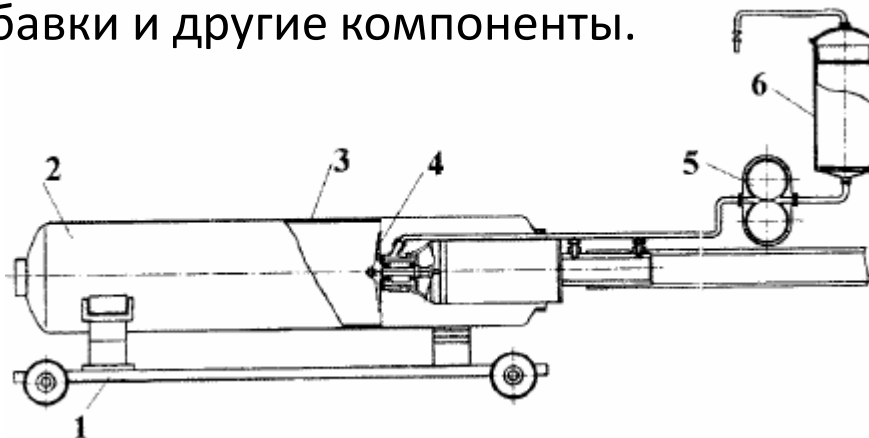
# Подготовка корпуса двигателя и оснастки

Более целесообразным является применение однослойного материала, совмещающего функции теплозащиты и крепящего состава.

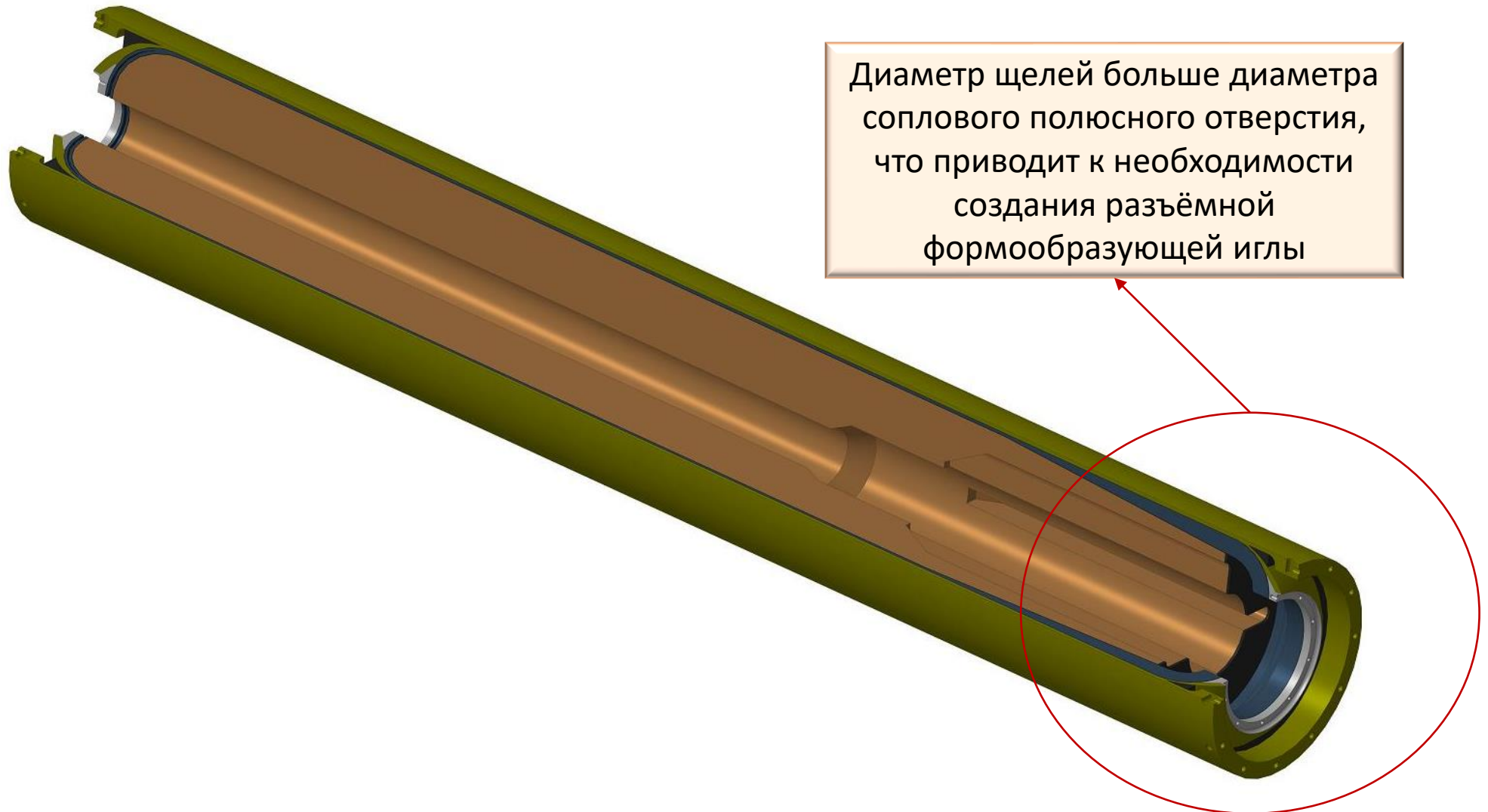
Для этой цели используются специальные жидкообразные пасты (бронемасса) на основе горючих-связующих, которые входят в состав топлива, предназначенные для прочного скрепления с корпусом двигателя.

Смешение компонентов бронемассы производится с вакуумированием в мешателях периодического действия. В состав вводится технический углерод как усиливающий наполнитель, отверждающие добавки и другие компоненты.

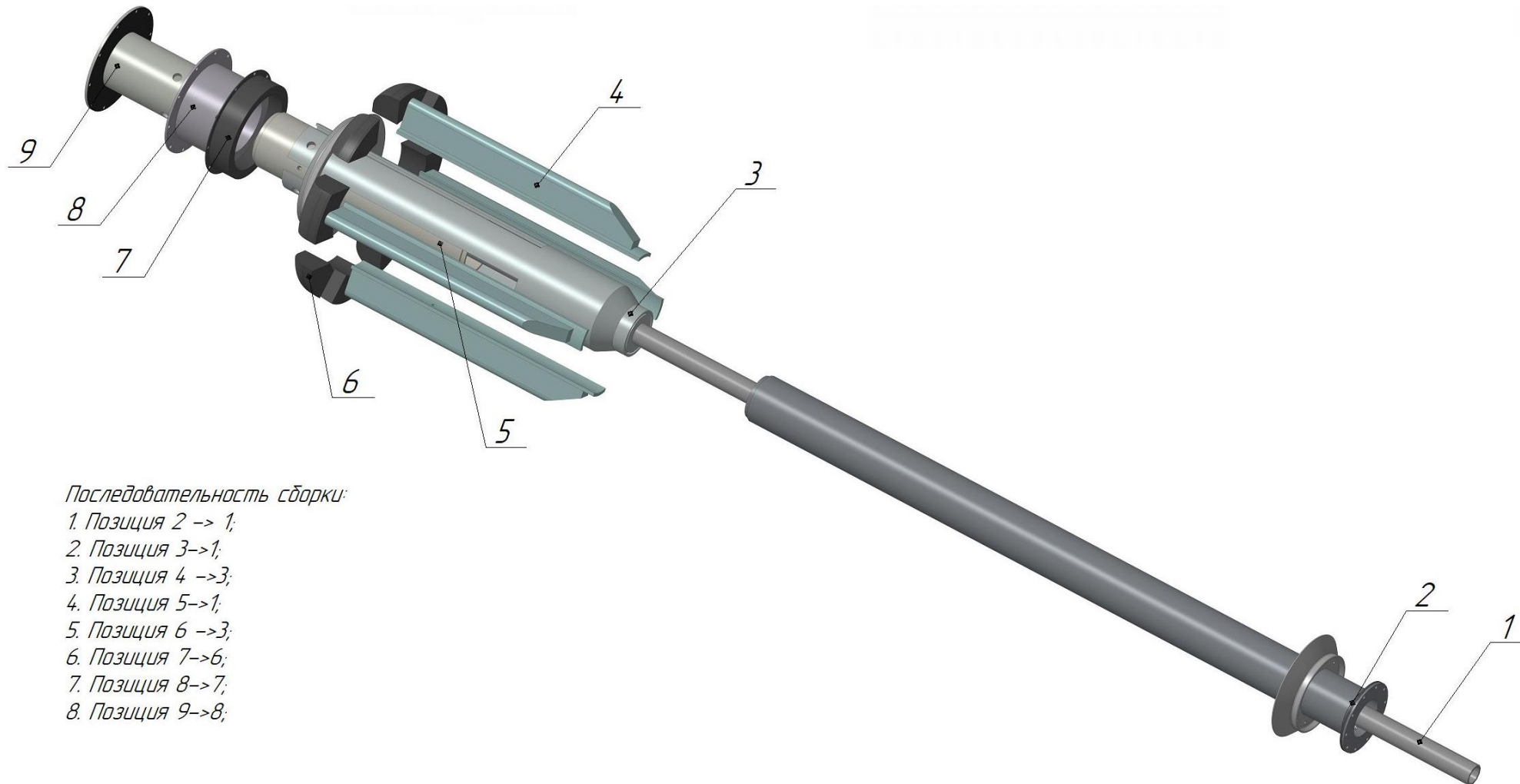
1 – платформа, 2 – корпус двигателя, 3 –  
бронепокрытие, 4 – распылитель, 5 – насос,  
6 – емкость для бронемассы



# Особенности заливки топливной массы в корпус



# Особенности заливки топливной массы в корпус



*Последовательность сборки:*

1. Позиция 2 → 1;
2. Позиция 3 → 1;
3. Позиция 4 → 3;
4. Позиция 5 → 1;
5. Позиция 6 → 3;
6. Позиция 7 → 6;
7. Позиция 8 → 7;
8. Позиция 9 → 8;

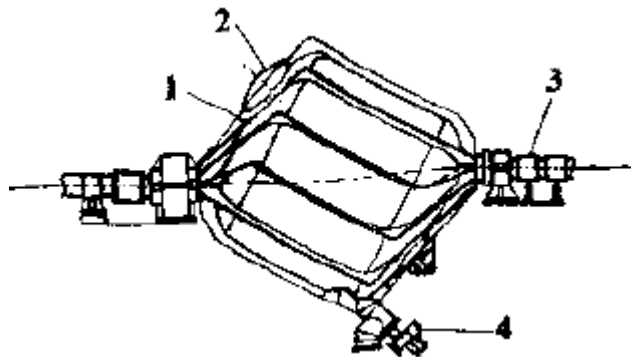
# Приготовление топливной массы методом свободного литья

Изготавливают составы с характеристиками:

$$\mu_{\text{каж}} \leq 6 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с} \quad \tau_0 < 500 \text{ Па}$$

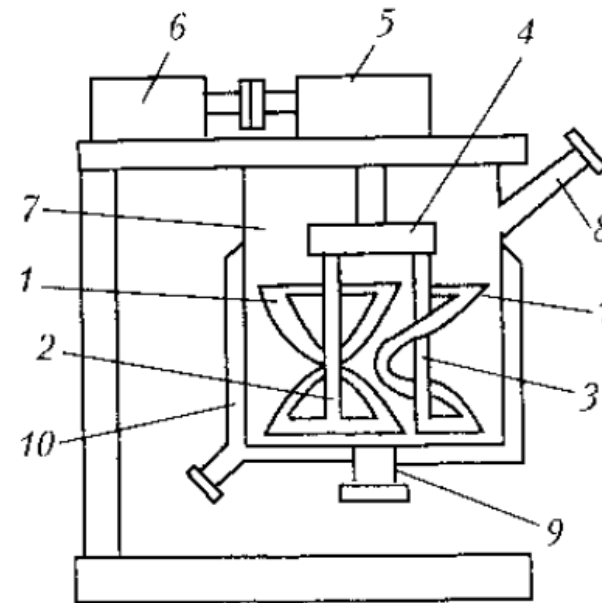
Используют аппараты двух конструкций:

- Емкостные смесители с мешалками
- Объёмные смесители



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

**Планетарный смеситель со спиральными мешалками**



1 – мешалки, 2,3 – оси мешалок, 4 – планетарный механизм, 5 – редуктор, 6 – электродвигатель, 7 – чаша, 8,9 – загрузочный и выгрузной патрубки, 10 – рубашка

# Приготовление топливной массы методом литья под давлением

Изготавливают составы с характеристиками:

$$\mu_{\text{каж}} \leq 10^3 - 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с} \quad \tau_0 = 0,5 - 6 \text{ кПа}$$

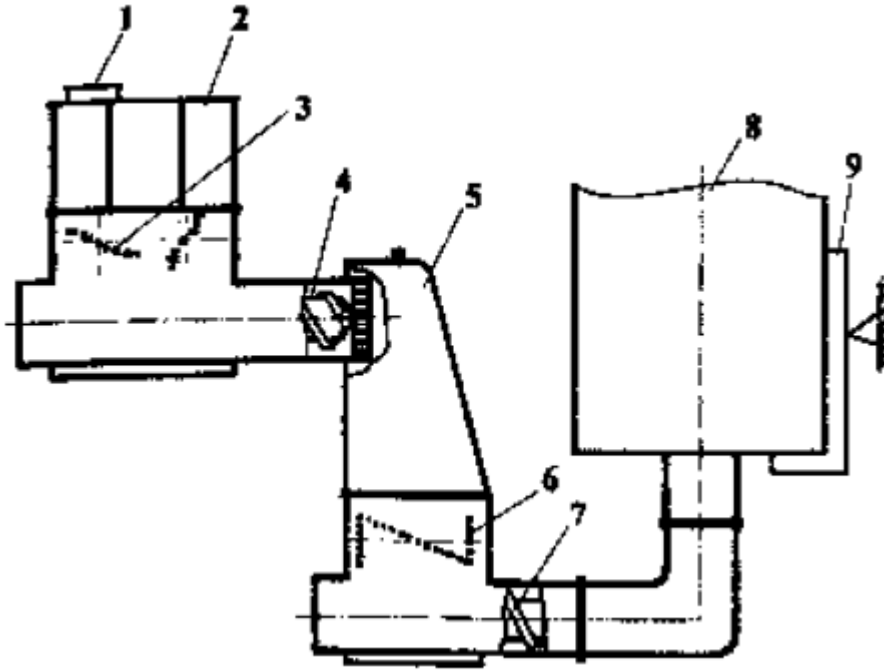
Для получения и переработки топливных масс этим методом используют **смеситель непрерывного действия** (СНД).

В аппарате СНД совмещаются операции:

- смешение компонентов
- вакуумирование топливной массы
- ее нагнетание в пресс-форму или корпус двигателя.



# Смеситель непрерывного действия



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

