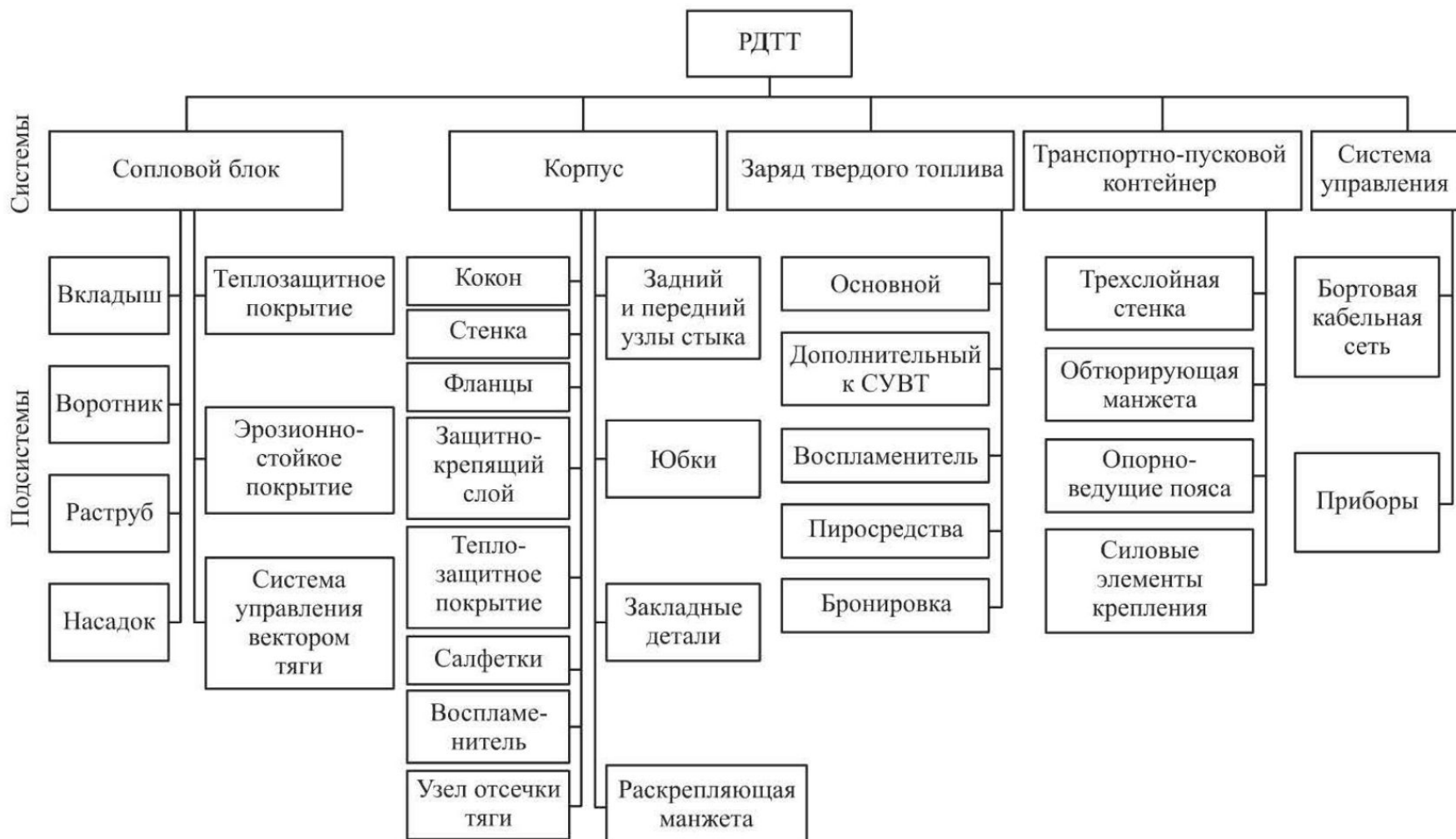


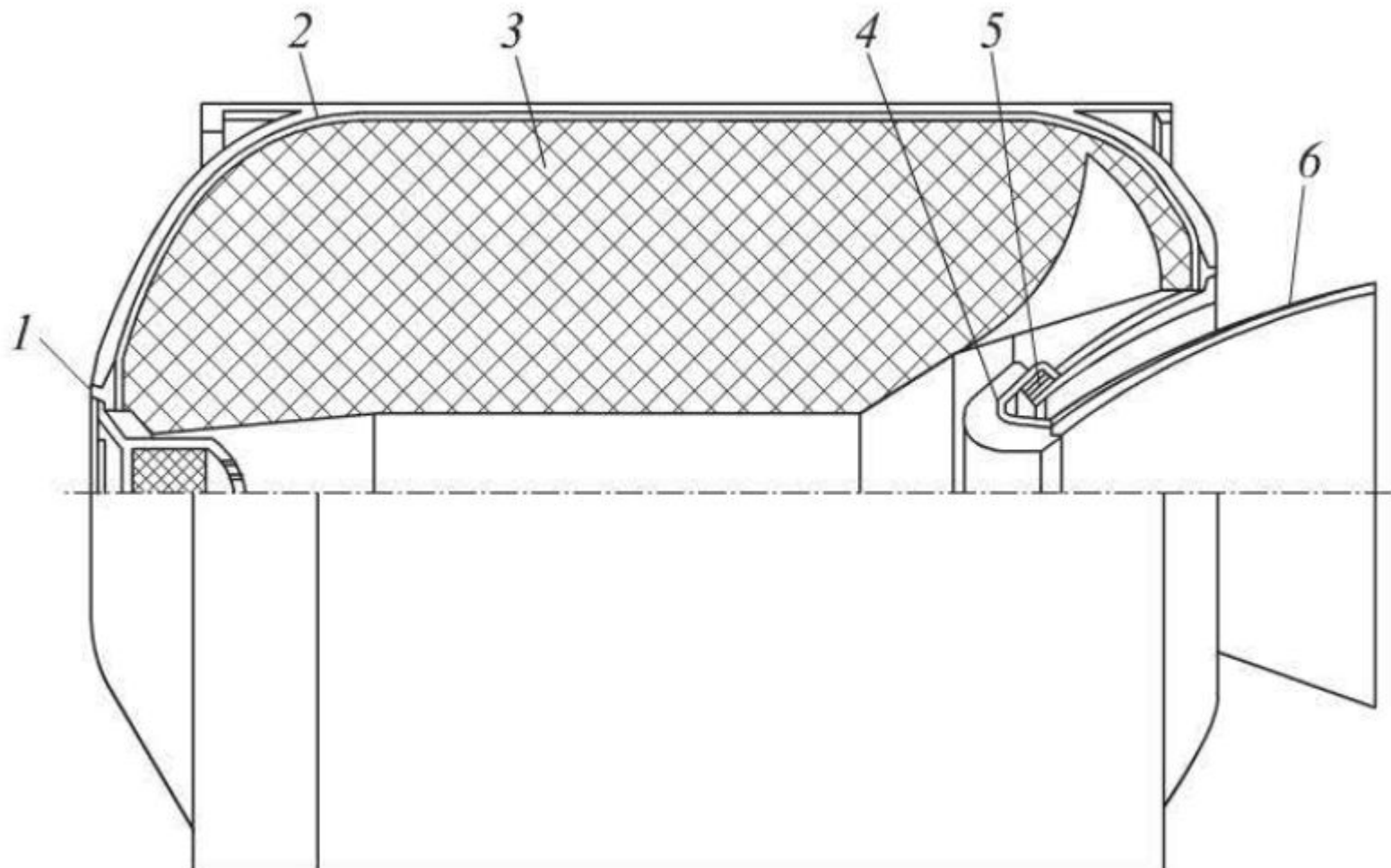
# ДЛА: НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

Лахин Антон Владиславович,  
к.т.н., доцент,  
начальник отдела разработки УУКМ,  
АО «Композит», г. Королев

# **ПРИМЕНЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (НМКМ) В ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ (РДТТ)**

# Структурная схема устройства РДТТ





**Рис. 1.2.** Конструктивная схема маршевого РДТТ:

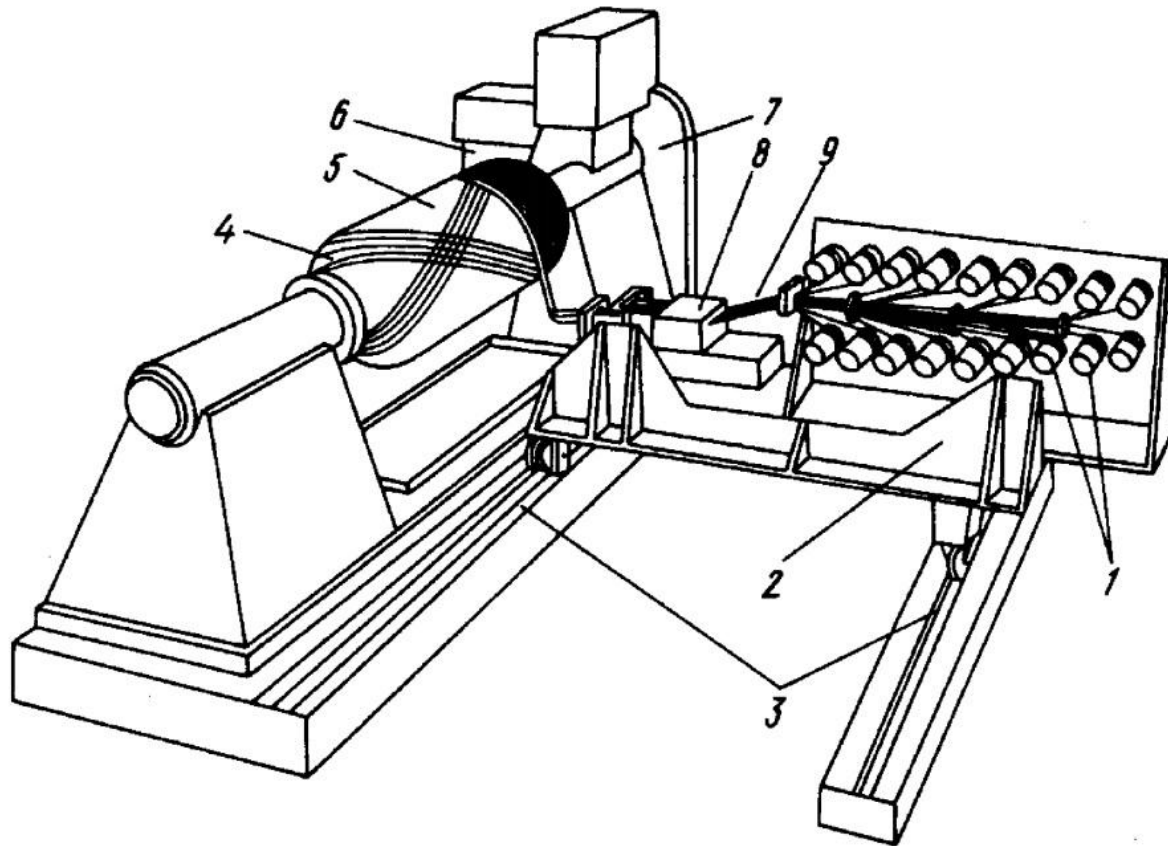
*a* — второй ступени МБР «Трайдент-1»; *б* — третьей ступени МБР «МХ»; *1* — передний фланец; *2* — корпус; *3* — заряд ТТ; *4* — сопловой блок; *5* — эластичный шарнир; *6* — раструб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка раструба сопла

# Системы

# Подсистемы



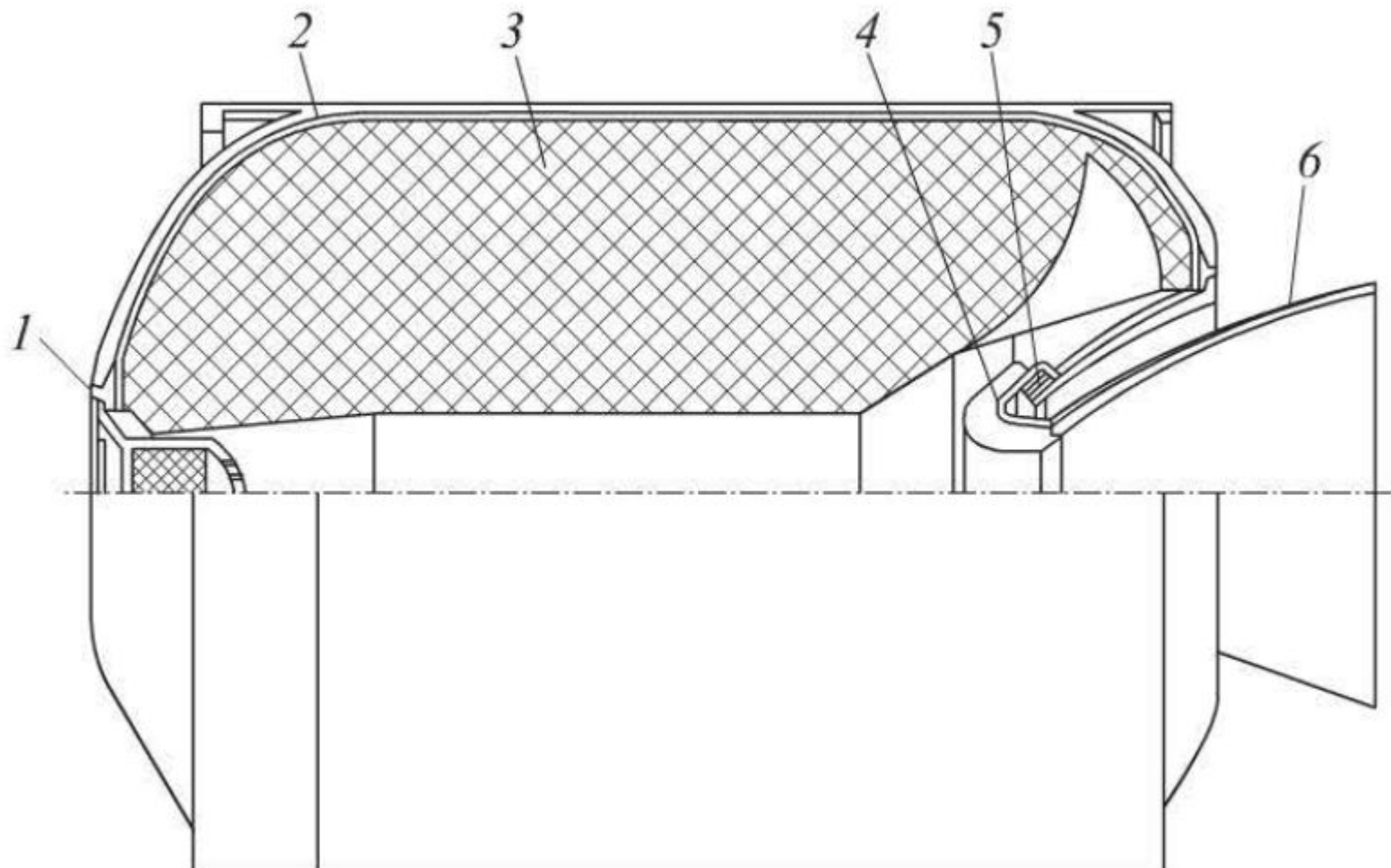
# Мокрая намотка



**Рис. 2.31.** Схема “мокрой” намотки:  
1 – шпули с нитями; 2 – шпулярник; 3 – направляющие перемещения намоточно-пропиточного тракта; 4 – спиральные слои; 5 – оправка; 6 – окружные слои; 7 – привод вращения; 8 – ванночка со связующим; 9 – сформированная пряжа

# Намотка препрегом





**Рис. 1.2.** Конструктивная схема маршевого РДТТ:

*а* — второй ступени МБР «Трайдент-1»; *б* — третьей ступени МБР «МХ»; *1* — передний фланец; *2* — корпус; *3* — заряд ТТ; *4* — сопловой блок; *5* — эластичный шарнир; *6* — раструб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка раструба сопла



# Резка каучука

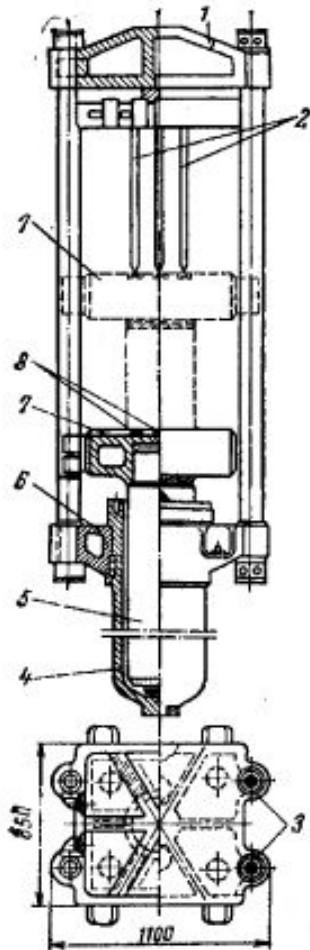


Рис. 23.1. Вертикальный нож с гидравлическим приводом:

1—верхняя неподвижная поперечина (траверса); 2—ножи-лезвия; 3—колонны; 4—гидравлический цилиндр; 5—плунжер; 6—станина; 7—стол; 8—прорезы на поверхности стола для входа ножей-лезвий.

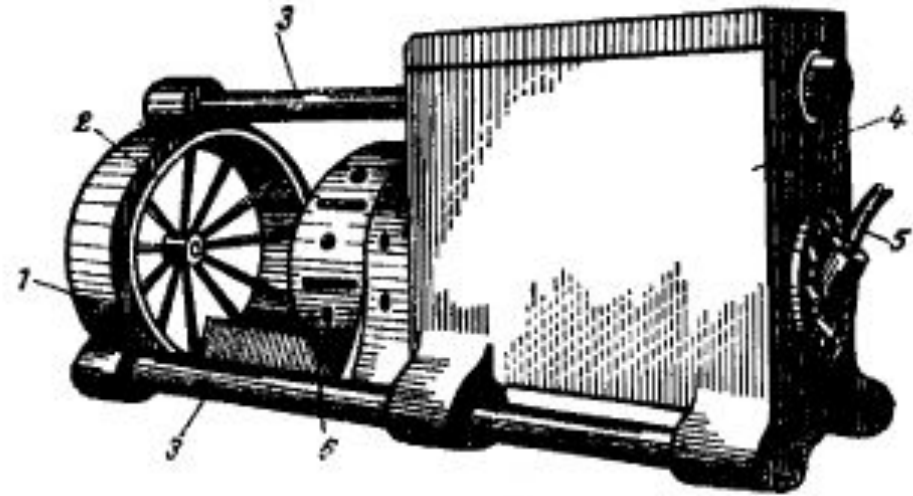


Рис. 23.2. Горизонтальный нож для резки НК:  
1—траверса; 2—головка с десятью ножами; 3—направляющие; 4—резервуар для масла; 5—трубопровод для подачи масла; 6—толкатель.

# Пластикация каучука на вальцах

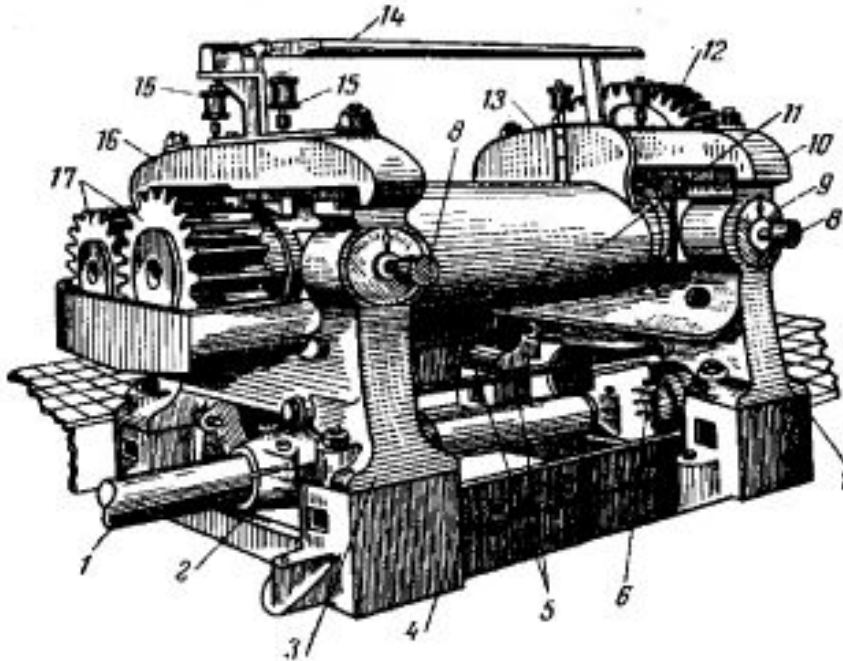


Рис. 23.4. Вальцы:

1—трансмиссионный вал; 2, 6—подшипники; 3, 7—станины; 4—фундаментная плита;  
5—стяжные болты; 8—регулирующие винты; 9—делительные диски; 10, 16—поперечины;  
11—передний валок; 12—большая приводная шестерня; 13—правая ограничительная стрела;  
14—тяга аварийного выключателя; 15—масленки; 17—передаточные шестерни

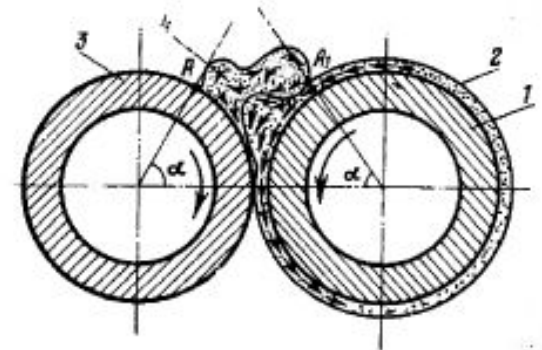


Рис. 23.5. Схема определения угла захвата  $\alpha$  валков:

1, 3—передний и задний валки; 2—слой материала на переднем валке; 4—запас материала,

# Пластикация каучука в резиносмесителе

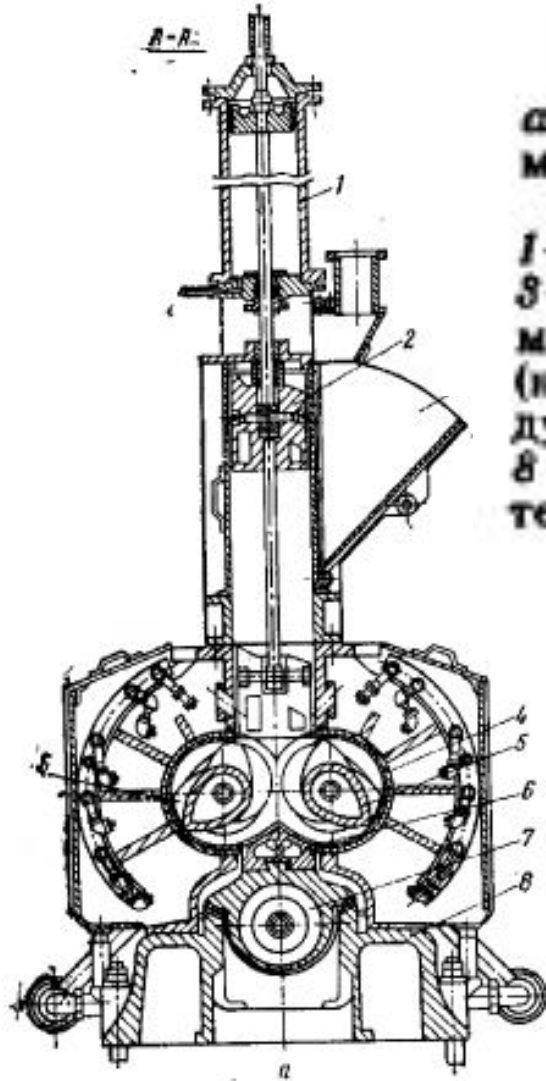
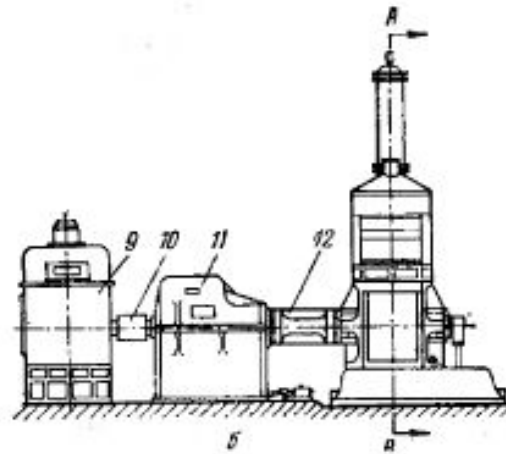


Рис. 23.6. Резиносмеситель 250-40:  
а — поперечный разрез через рабочую камеру;  
б — внешний вид резиносмесителя с электродвигателем и редуктором;  
1 — воздушный цилиндр; 2 — верхний затвор;  
3 — загрузочная воронка; 4 — рабочая камера;  
5 — роторы; 6 — откидная дверца (нижний затвор); 7 — горизонтальный воздушный цилиндр разгрузочного устройства;  
8 — фундаментная плита; 9 — электродвигатель; 10 — упругая муфта; 11 — блок-редуктор; 12 — шарнирные муфты.



# Каландрование каучука

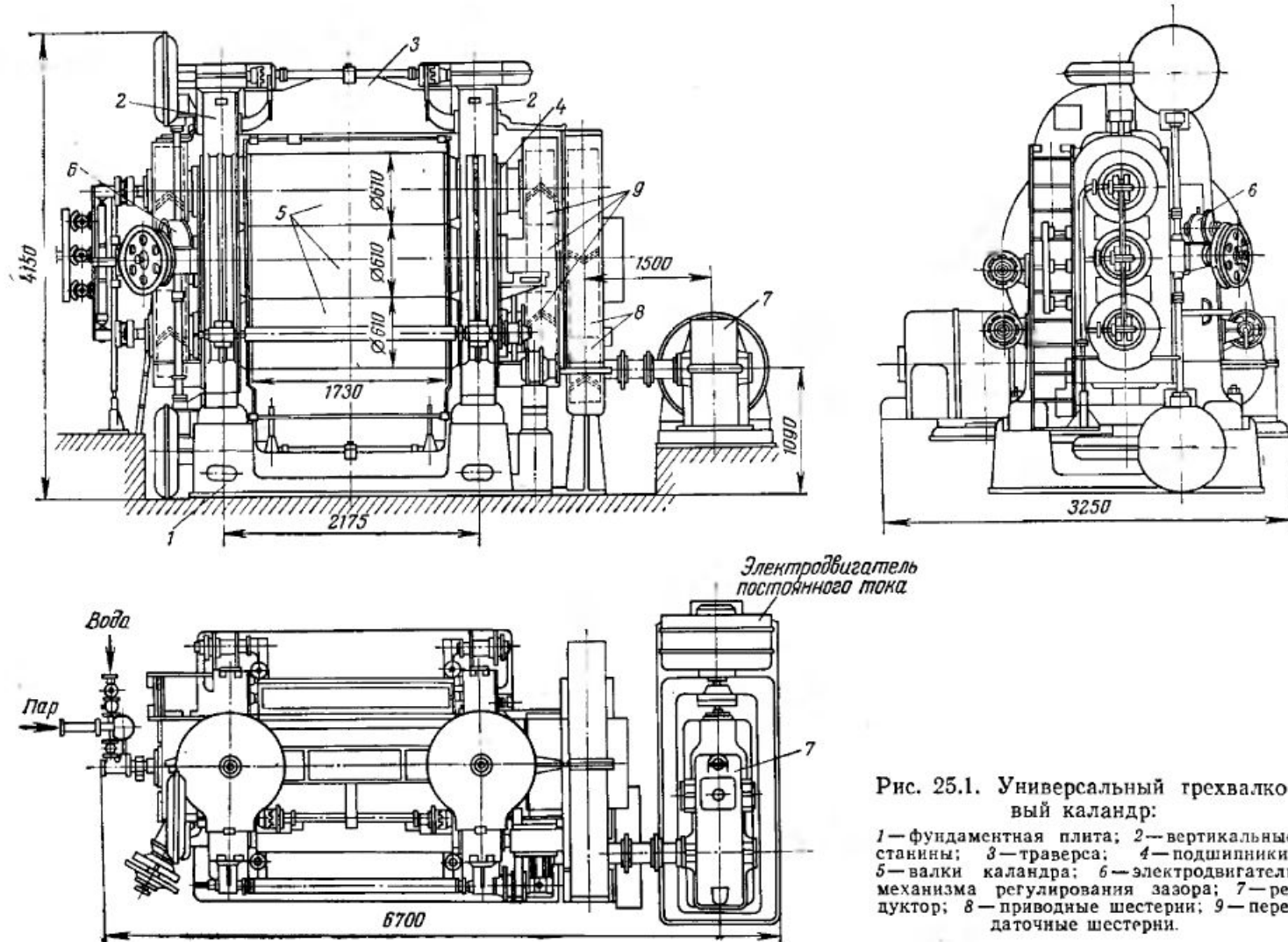


Рис. 25.1. Универсальный трехвалковый каландр:

1—фундаментная плита; 2—вертикальные станины; 3—траверса; 4—подшипники; 5—валки каландра; 6—электродвигатель механизма регулирования зазора; 7—редуктор; 8—приводные шестерни; 9—передаточные шестерни.

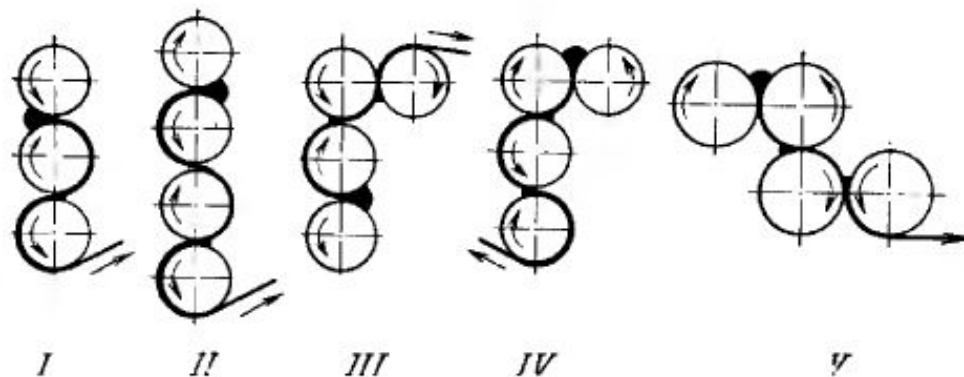
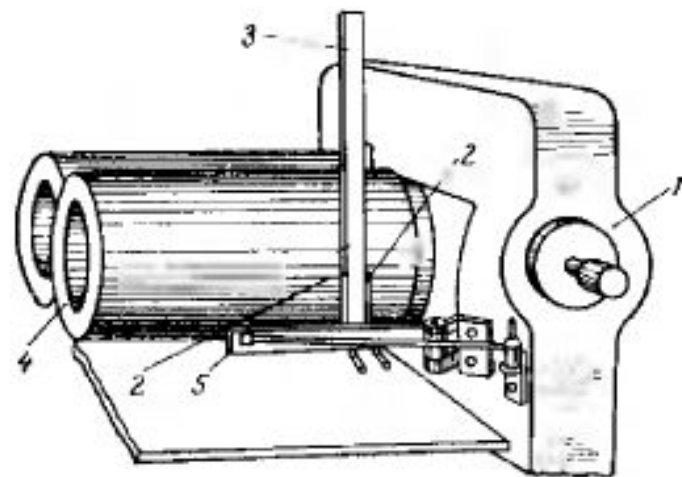


Рис. 25.2. Листование резиновых смесей на различных каландрах:  
 I — трехвалковым; II — четырехвалковым; III, IV — четырехвалковым с выносным валком;  
 V — четырехвалковым с Z-образным расположением валков.

Рис. 25.3. Схема непрерывной подачи резиновой смеси с питательных валцов:

1 — правая станина валцов; 2 — пластинчатые ножи;  
 3 — лента резиновой смеси; 4 — передний валок;  
 5 — кронштейн.



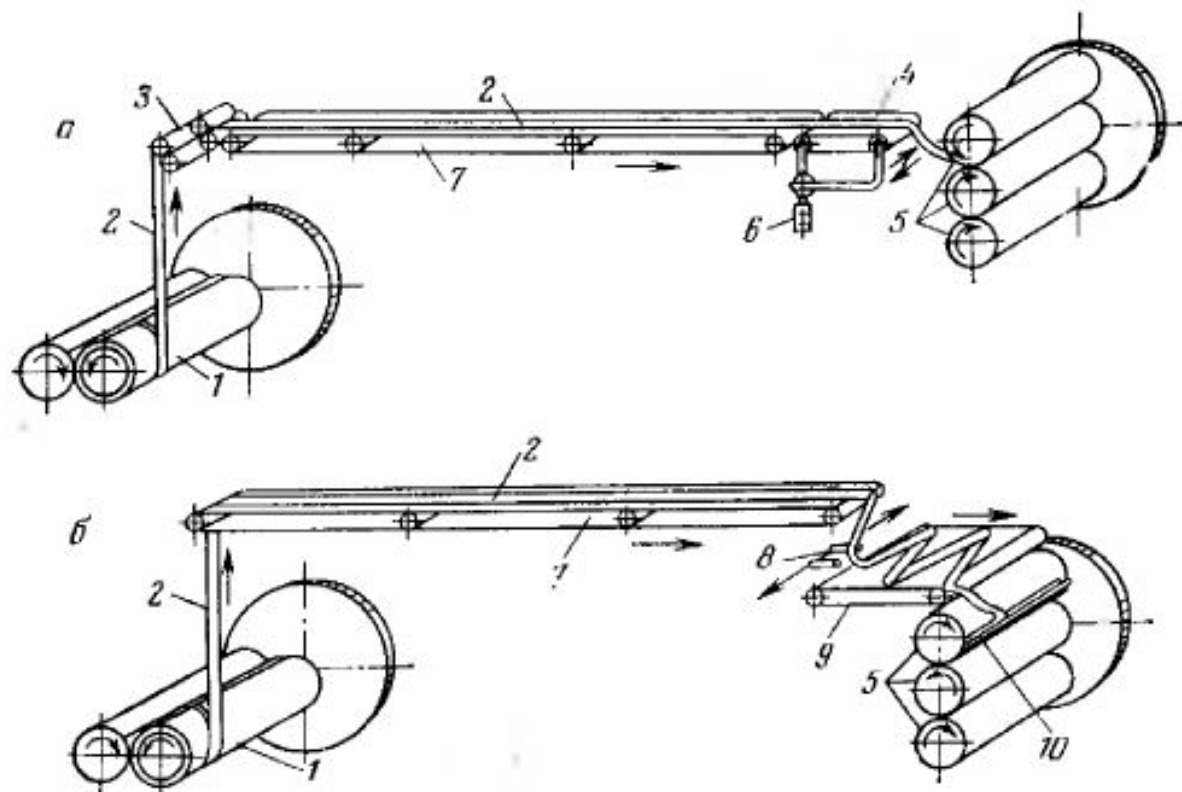


Рис. 25.4. Схемы непрерывного питания трехвалкового каландра с распределением резиновой смеси по поверхности валка каландра с помощью качающегося транспортера (а) или распределительных роликов и дополнительного ленточного транспортера (б):

1—питательные валцы; 2—лента резиновой смеси; 3, 7—захватывающий и питательный; ленточные транспортеры; 4—качающийся загрузочный транспортер; 5—валки каландра; 6—привод качающегося загрузочного транспортера; 8—распределительные ролики; 9—загрузочный ленточный транспортер; 10—загрузочное приспособление.

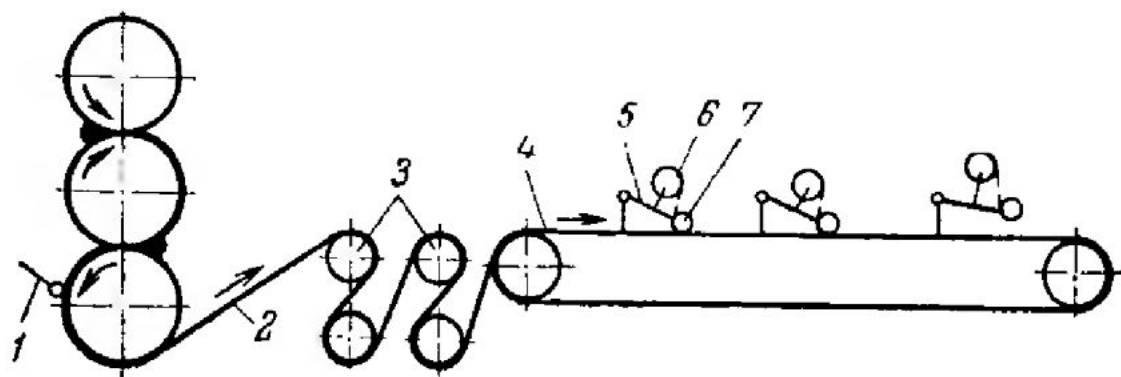


Рис. 25.5. Схема листования резиновых смесей на трехвалковом каландре:  
 1—ножи для закроя полос резиновой смеси; 2—полоса листованной резиновой смеси;  
 3—охлаждающие барабаны; 4—закаточный транспортер; 5—рычажное закатывающее устрой-  
 ство; 6—рулон с прокладочным полотном; 7—рулон листованной резины с прокладкой.

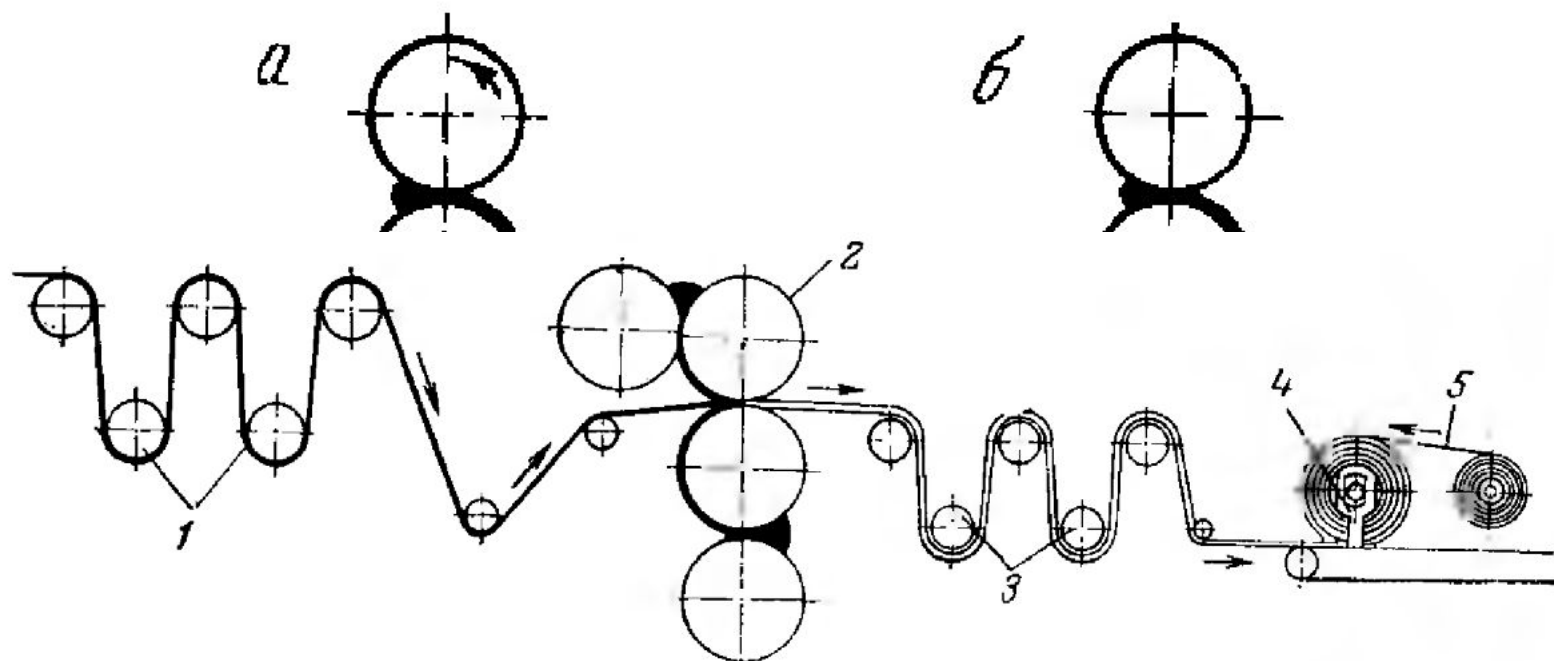


Рис. 25.10. Схема двухсторонней обкладки тканей:

1—сушильные барабаны; 2—четырёхвалковый каландр; 3—охлаждающие барабаны; 4—зака-  
точное устройство; 5—прокладка.

1—3—ролики для ткани; 4—направляю-  
щий ролик; 5—валик с прокладочным хол-  
стом.



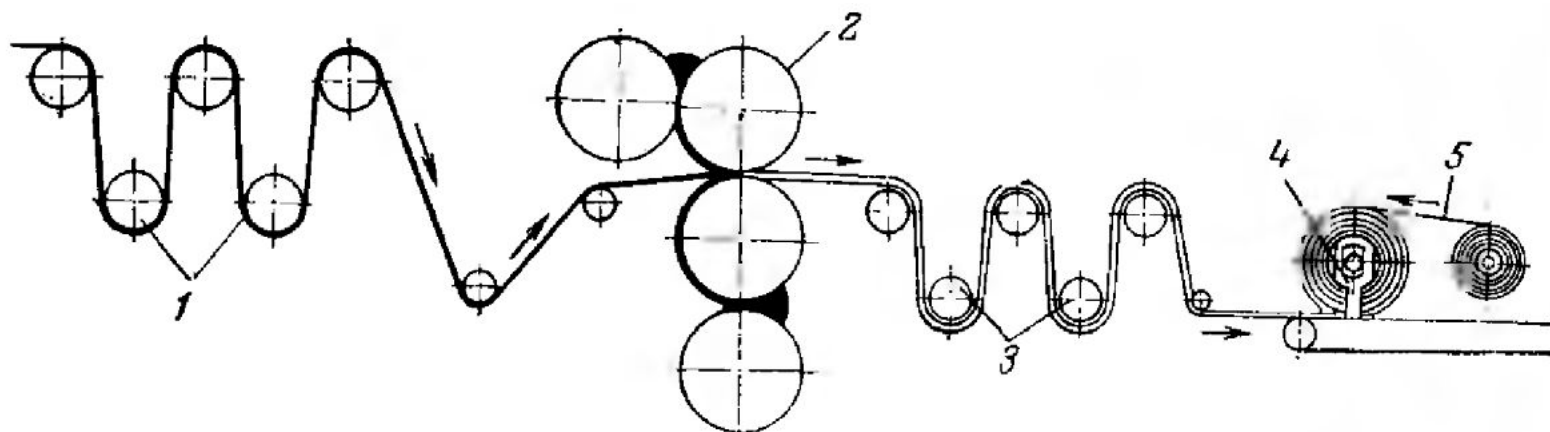


Рис. 25.10. Схема двухсторонней обкладки тканей:  
 1—сушильные барабаны; 2—четырёхвалковый каландр; 3—охлаждающие барабаны; 4—зака-  
 точное устройство; 5—прокладка.

### Свойства некоторых типов ТЗМ

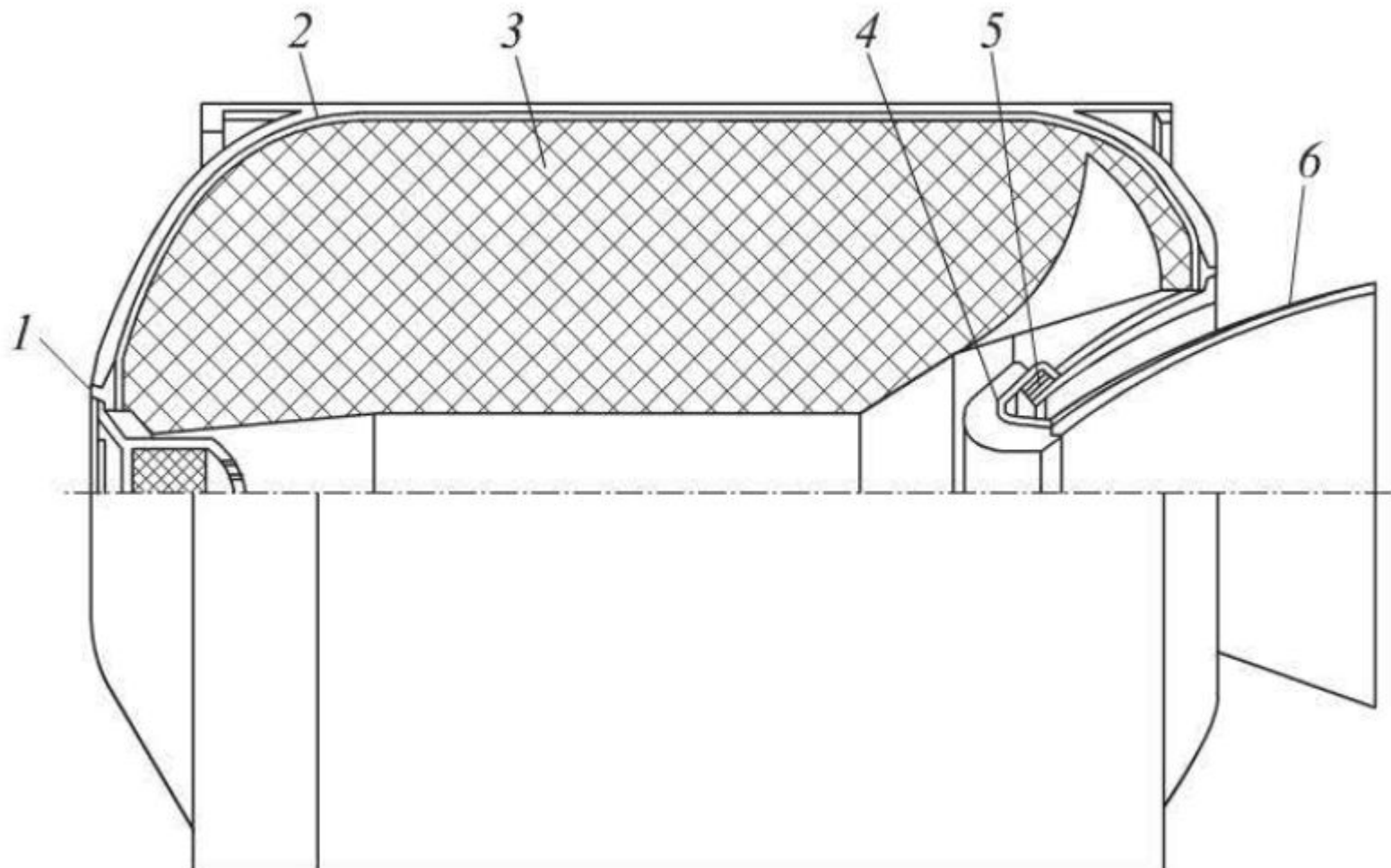
Свойство	Тип				
	51-2058	51-2110	51-2101	АФК-В	КНК
Плотность, $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>	1,12–1,20	1,08–1,09	1,13–1,16	1,00–1,15	0,75–0,85
Прочность при растяжении, МПа	9	9	5	14–25	3,5
Относительное удлинение, %	300	450	60	7–8	60
Модуль упругости при = 10 %, МПа	4–9	4–9	71	140	14–20
Теплопроводность, Вт/(м × К)	0,20–0,25	0,20–0,24	0,23–0,28	0,29–0,34	0,16–0,19
Температуропроводность, $10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с	1,13–1,35	1,26–1,48	1,28–1,47	1,78–2,11	1,30–1,41
Средний ТКЛР, $10^{-6}$ К <sup>-1</sup>	115–145	210–255	103–141	10	75–105
Коэффициент Пуассона	0,39	0,45	—	0,21	0,47
Параметр эффективности, см <sup>2</sup> × с/г при скорости газов (м/с):					
10	38	67	67	—	84
25	26	47	—	41	63
50	16	22	48	—	28
100	—	—	35	32,5	—
Выход коксового остатка в инертной среде, %	27–28	22–24	31–32	—	—
Содержание летучих при полном пиролизе, г/см <sup>3</sup>	0,86	0,89	0,80	—	—

Примечание. Параметр эффективности определялся при  $p = 4,5 \pm 1,0$  МПа.

Подсистемы

Системы



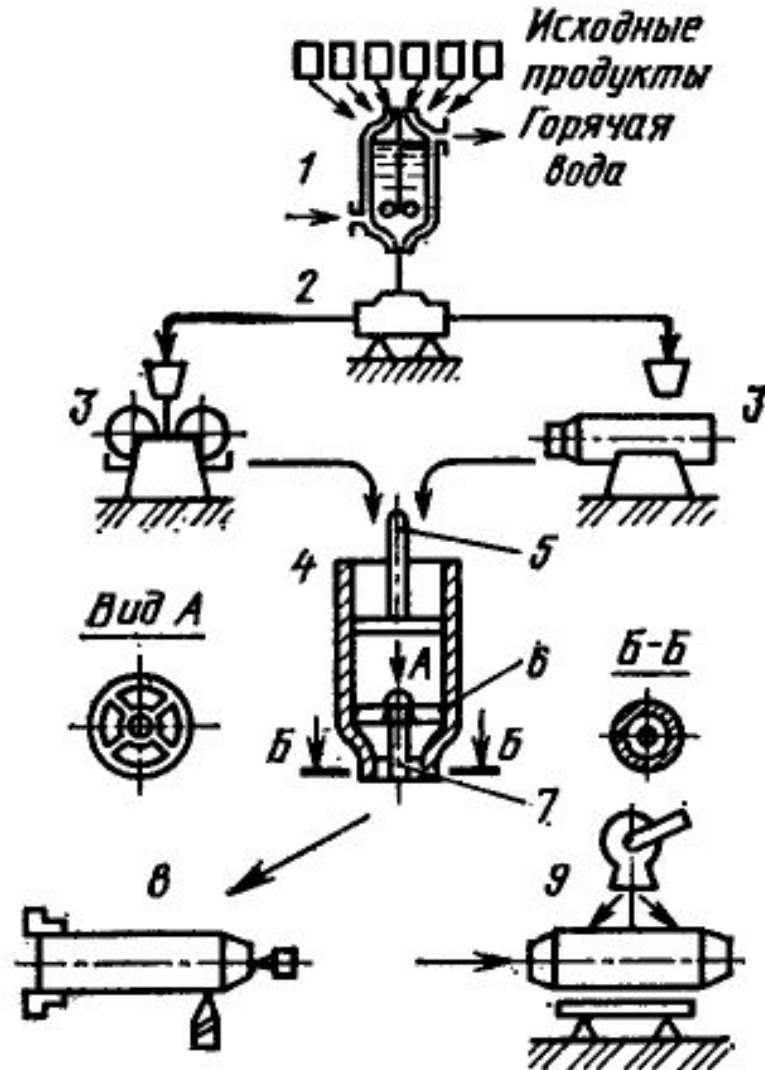


**Рис. 1.2.** Конструктивная схема маршевого РДТТ:

*a* — второй ступени МБР «Трайидент-1»; *б* — третьей ступени МБР «МХ»; *1* — передний фланец; *2* — корпус; *3* — заряд ТТ; *4* — сопловой блок; *5* — эластичный шарнир; *6* — раструб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка раструба сопла

# Схема изготовления зарядов из нитроцеллюлозного топлива

- 1-Лопастной смеситель
- 2-центрифуга
- 3-цилиндрические вальцы (каландры)
- 4-пресс
- 5-плунжер
- 6-матрица
- 7-фильера
- 8-станок мехобр.
- 9-неразр. контроль



Состав некоторых коллоидных ТРТ [79, 90, 123]

Компонент	Содержание (в % по массе) в топливах				
	JPN США	M-13 США	МК-18 США	Н СССР	НМ-2 СССР
Нитроцеллюлоза *	<u>51,5</u>	<u>57,3</u>	<u>53,62</u>	<u>57</u>	<u>54</u>
	13,25	13,15	13,23	12	12
Растворители:					
нитроглицерин	43	40	43	28	27
динитротолуол	—	—	—	11	15
Стабилизаторы:					
централит	1,0	1,0	0,75	3	—
Катализаторы горения:					
сульфат калия	1,2	1,5	0,82	—	—
Пластификатор (воск, вазелин)	0,08	—	—	1	2
Краситель (сажа)	0,22	0,05	0,22	—	—
Флегматизатор (окись магния)	—	—	—	—	2
Поглотитель влаги (диэтилфталат)	3,0	—	1,18	—	—
Прочие присадки	—	0,014	—	—	—

\* В знаменателе показана степень нитрации нитроцеллюлозы.

# Схема изготовления зарядов из смесового топлива циклическим способом

- 1-Лопастной смеситель
- 2-контейнер
- 3- корпус двигателя
- 4-термостат
- 5-мехобработка
- 6-дефектоскопия

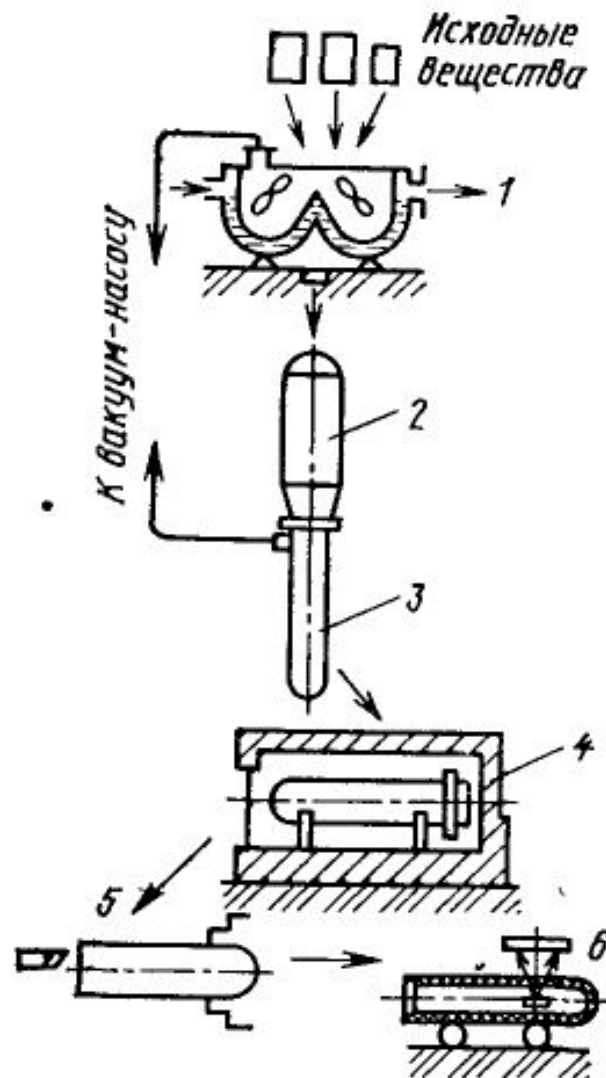
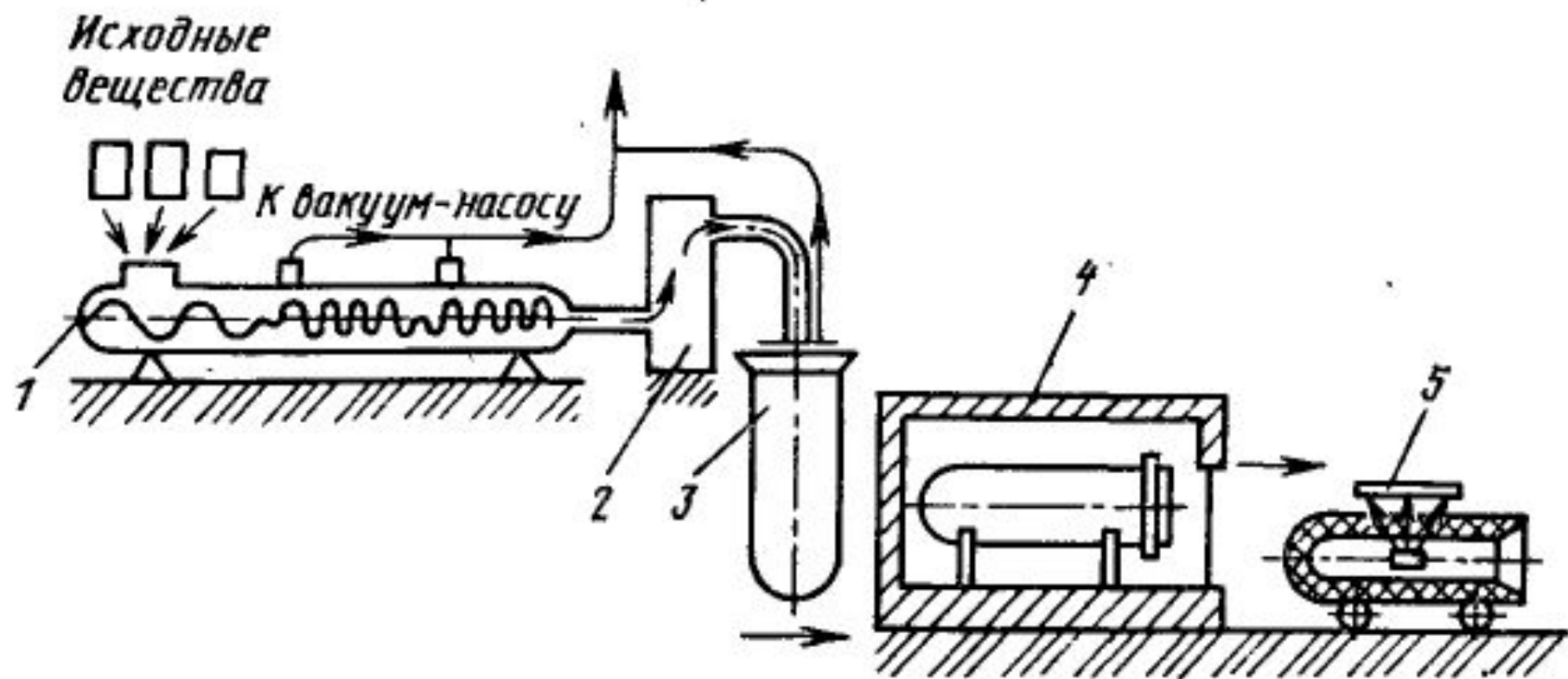


Схема изготовления топливного заряда непрерывным способом:



- 1 — смеситель; 2 — анализатор качества смеси;  
3 — контейнер; 4 — термостат;  
5 — дефектоскоп



Составы некоторых смесевых ТРТ [54, 70, 90, 123]

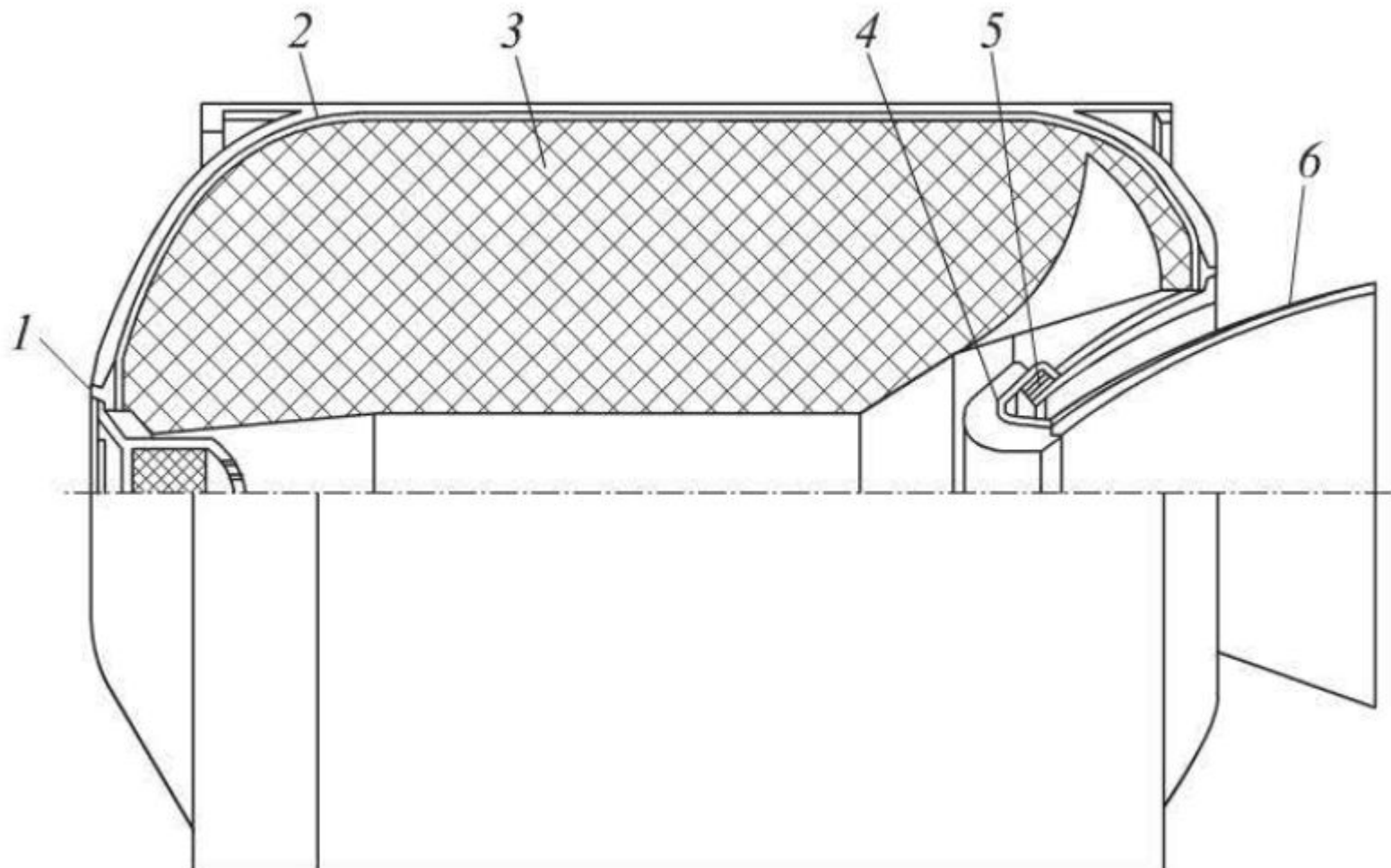
Компонент	Содержание (в % по массе) в топливах			
	для РДТТ Ø 6,6 м США	РД 2435 Англия	AL T-161 США	Франция
Окислители:				
Перхлорат аммония	72 (76,61)	63		55,5
Пикрат аммония		14		
Перхлорат калия			76	
Горючие:				
Полибутадиеновый полимер	11 (6,39)			
Полиуретан				15,4
Полиизобутадиен + этилолеат		11		
Битум			16,8	
Алюминий	16	12		13,8
Пластификатор			7,2	3,9
Другие добавки	1			11,4

Свойства окислителей для смесевых топлив

Количество кислорода в одном объеме, %	Реакция высокотемпературного распада	Температура сгорания, ккал/кг	Температура плавления, °С	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Молекулярный вес	Формула	Окислитель
46	$KClO_4 \rightarrow KCl + 2O_2$	775	600 (разлагается)	2,5	138,5	$KClO_4$	Перхлорат калия . . .
60	$LiClO_4 \rightarrow LiCl + 2O_2$	940		2,43	106,4	$LiClO_4$	Перхлорат лития . . .
34	$2NH_4ClO_4 \rightarrow 3H_2O + 2HCl + N_2 + 2,5O_2$	591	150 (разлагается)	1,88	117,5	$NH_4ClO_4$	Перхлорат аммония
40	$2KNO_3 \rightarrow K_2O + N_2 + 2,5O_2$	1160	333	2,10	101,1	$KNO_3$	Нитрат калия . . . . .
20	$NH_4NO_3 \rightarrow 2H_2O + 0,5O_2 + N_2$	1090	169	1,70	80,05	$NH_4NO_3$	Нитрат аммония . . .

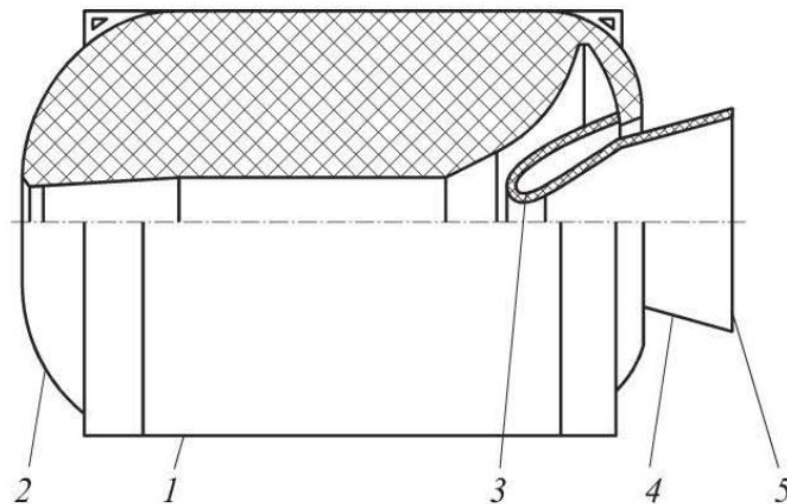
# Структурная схема устройства РДТТ





**Рис. 1.2.** Конструктивная схема маршевого РДТТ:

*а* — второй ступени МБР «Трайдент-1»; *б* — третьей ступени МБР «МХ»; *1* — передний фланец; *2* — корпус; *3* — заряд ТТ; *4* — сопловой блок; *5* — эластичный шарнир; *6* — раструб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка раструба сопла



**Рис. 2.15.** Схема расположения характерных зон ракетного двигателя:

1 — днище; 2 — корпус РДТТ; 3 — вкладыш; 4 — раструб; 5 — срез сопла

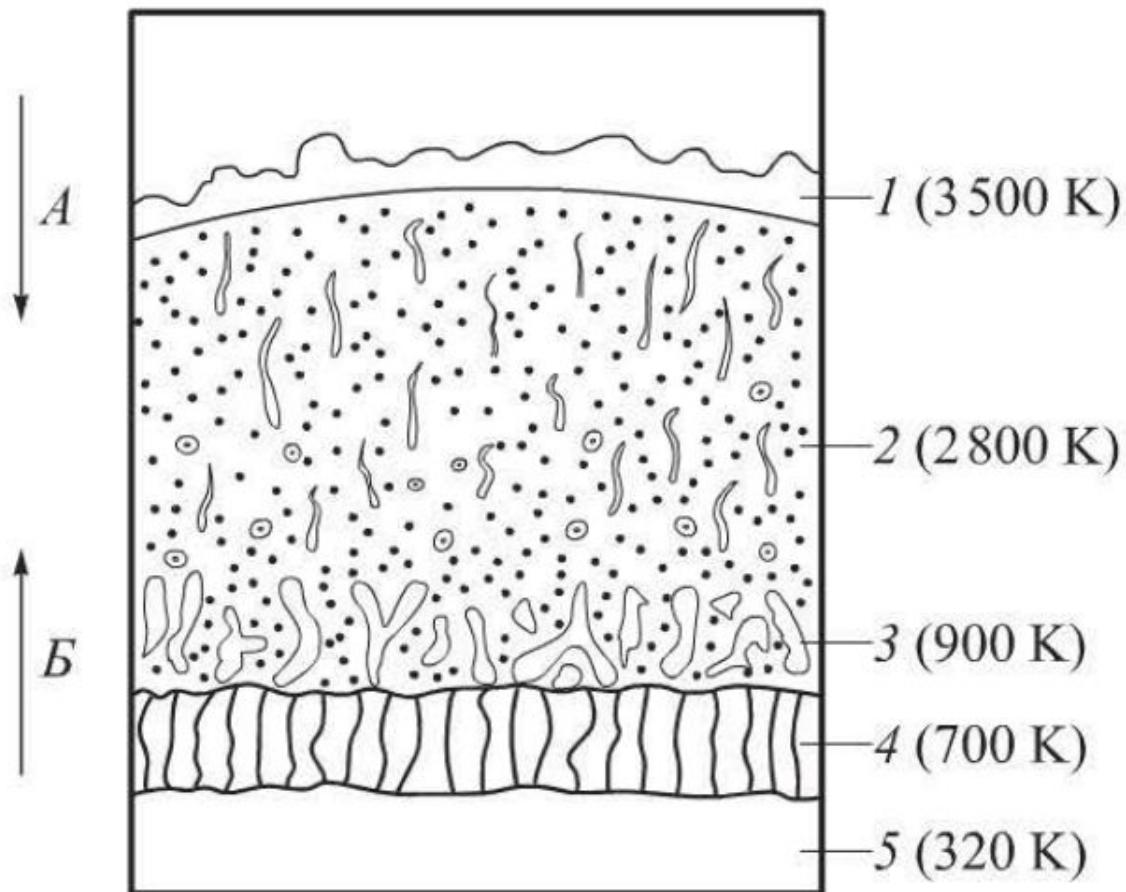
**Таблица 2.35. Характеристики рабочего процесса РДТТ в различных зонах**

Параметр	Зона				
	1	2	3	4	5
Температура газа $T$ , К	1 750...4 000	80...95 %*	80 %*	50...60 %*	30...40 %*
Давление газа $p$ , МПа	0,5...20	90...95 %**	40...60 %**	25...20 %**	0,5...2,0 %**
Скорость истечения газа $W$ , м/с	0...300	350...1 000	1 000...1 200	1 500...1 800	2 500...3 500

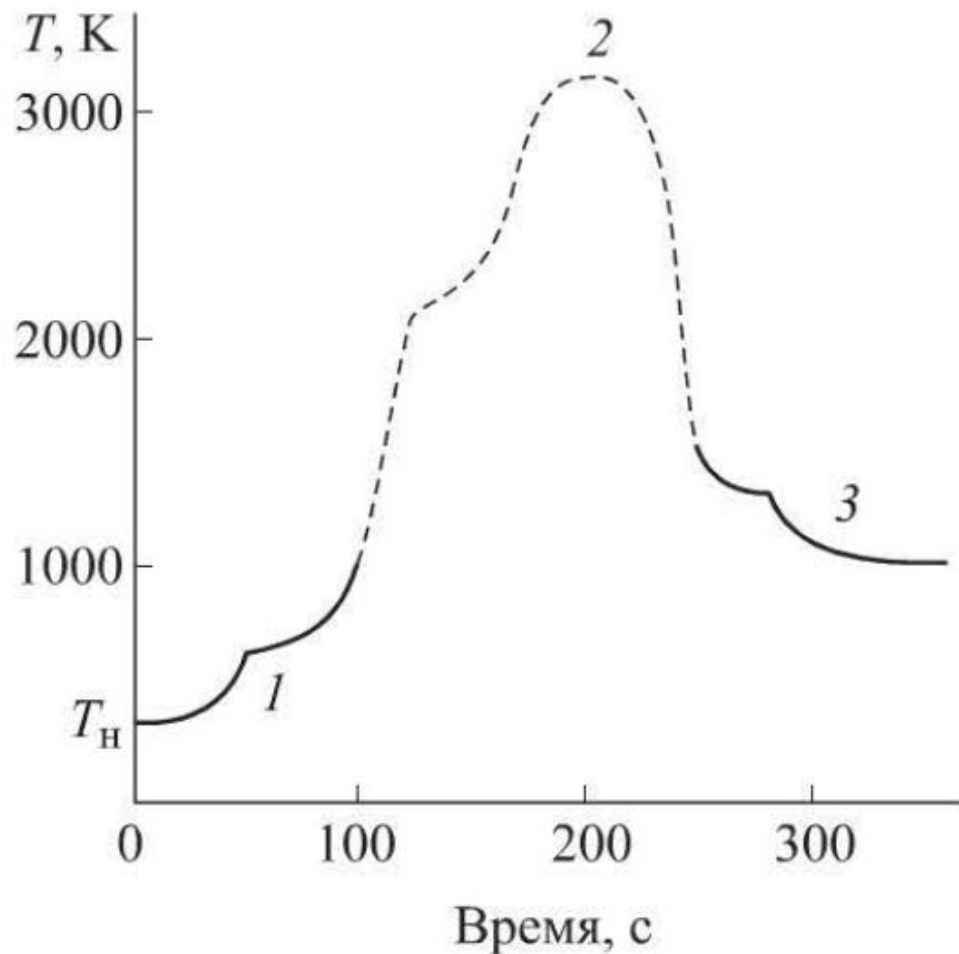
\* От температуры зоны 1.

\*\* От давления зоны 1.

# Поперечный разрез фенольного стеклопластика, подвергнутого абляции:



*A* — поток теплоты и газов; *B* — поток массы аблятора; 1 — капли расплава стекла (слой 0,1...0,4 мм); 2 — плотный прококсованный слой (1...1,5 мм); 3 — пористый обуглившийся слой (0,3...0,5 мм); 4 — слой деструкции связующего (0,3...0,5 мм); 5 — стенка исходного стеклопластика



**Рис. 2.13.** Основные процессы, протекающие в работающем абляторе:  
 1 — деструкция связующего; 2 — пиролиз наполнителей; 3 — догорание кокса

Критериями выбора теплозащитного материала (ТЗМ) служат параметры полной энтальпии\*  $J_{\text{эф}}$  кДж/кг (теплосодержание материала) или эффективной теплоты абляции  $H_{\text{эф}}$  (кВт · с)/кг:

$$H_{\text{эф}} = \frac{q_0}{\dot{m}},$$

где  $q_0$  — скорость теплопередачи (поток теплоты) через поверхность площадью  $1 \text{ см}^2$ , кВт/см<sup>2</sup>;  $\dot{m}$  — скорость потери массы материала с поверхности площадью  $1 \text{ см}^2$ , кг/см<sup>2</sup>.



Таблица 2.34. Полная энтальпия ПКМ

Материал	Лэф, МДж/кг	Материал	Лэф, МДж/кг
Асбопластик	30...90	Термопласт с наполнителем	50...90
Стеклопластик	50...110	Эластомер с наполнителем	10...50
Углепластик	20...100	УУКМ*	120
Органопластик	40...60	Воздух**	0,025

\* Этот высокоэнтальпийный материал не является аблятором.

\*\* Приведен для сравнения.

**Таблица 2.36. Плотность тепловых потоков на наружной поверхности  
стенки, характерная для условий эксплуатации  
некоторых конструкций, МВт/м<sup>2</sup>**

Конструкция	Значение (элемент конструкции)
Камеры сгорания ЖРД	5...17 (ЖРД малой тяги) 80...120 (маршевые ЖРД)
РДТТ	1...20 (корпус РДТТ); 22...30 (вкладыш сопла)
Аппарат, входящий в плотные слои атмосферы Земли:	
ГЧ баллистической ракеты	6...17 (наконечник ГЧ); 0,5...5 (бок ГЧ)
СА ИСЗ	20...40 (лобовой экран СА)
орбитальный корабль типа «Шаттл»	7...30 (носок обтекателя, кромки крыльев и рулей); 0,8...1,2 (нижняя часть фюзеляжа) 0,1...0,5 (верхняя часть фюзеляжа)
Аппарат, летящий в припо- верхностном слое атмосферы Земли:	
самолет	0,02...0,25 (наружная обшивка)
ракета на восходящей ветви траектории полета	0,2...1 (наружная обшивка)

Таблица 3.30. Свойства основных абляторов

Абляторы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удлинение при разрыве, %	Прочность, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент линейного расширения ×10 <sup>6</sup> , 1/К	Скорость уноса массы, мм/с	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>
				Теплоемкость, кДж/(кг × К)			Удельная теплота абляции, МДж/кг
Жесткие	1,4...1,85	0,8...3,0	16...330	0,1...10,5	1...100	0,01...1,4	1,4...420
Эластомерные	0,65...1,3	12...75	0,3...26	0,6...3,8	4...200	0,02...1,8	5...100
				0,1...0,9			1,2...20
Термопластичные	0,3...0,9	0,2...14	0,5...200	0,6...2,6	4...150	0,17...1,2	0,02...3,7
				0,2...1,1			0,2...30
				0,4...3,0			0,4...5,0

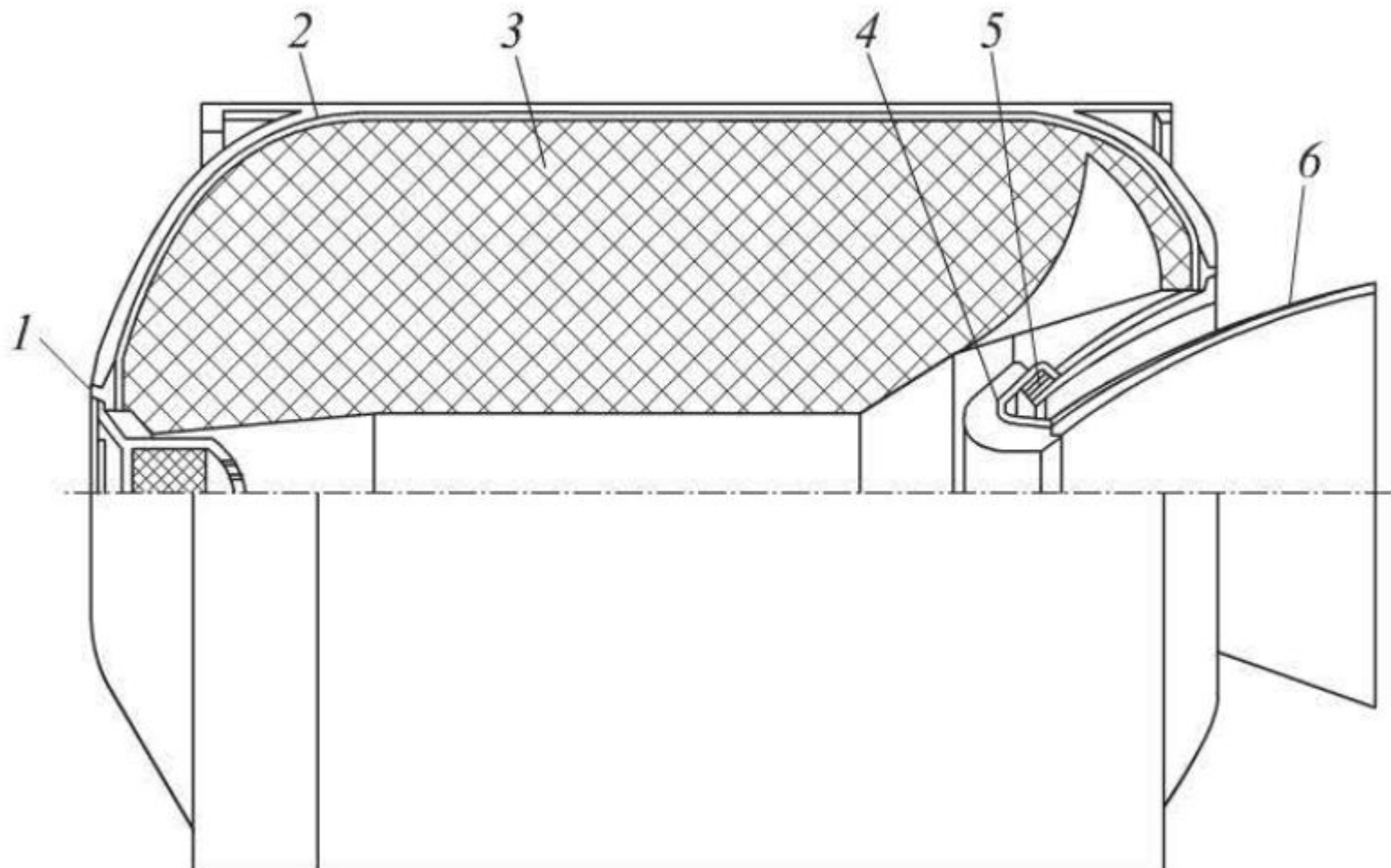
**Таблица 2.33. Полная энтальпия материалов, используемых для абляционной теплозащиты некоторых конструкций, МДж/кг**

Конструкция	Значение энтальпии (элемент конструкции)
Внутренняя теплозащита стенок корпуса РДТТ и наружная теплозащита диафрагм, экранов, ферм и др.	0,2...4 (наполненные эластомеры); 1,4...9 (стеклопластики, асбопластики, органопластики, наполненные термопласты, углепластики)
Наружная теплозащита стенок корпуса головной части и спускаемого аппарата, входящих в плотные слои атмосферы Земли, стенки камер сгорания ЖРД небольшой тяги	6...32 (фенольные, полиамидные, кремнийорганические и полиэфирные абляторы на кремнеземных, кварцевых, асбестовых и графитовых волокнах); 0,25...5 (ненаполненные термопласты, сублимирующие без коксообразования); 40...90 (комбинированные многослойные и модифицированные абляторы)
Наружная теплоизоляция стенок корпуса орбитального корабля типа «Шаттл»	25...70 (углерод-углеродный композиционный материал); 1...7 (пористый керамический композиционный материал на основе кварцевого волокна)
Стенки без теплозащиты и теплоизоляции	0,33...0,65 (алюминиевые сплавы); 0,7...0,85 (стали, титановые сплавы)

Системы

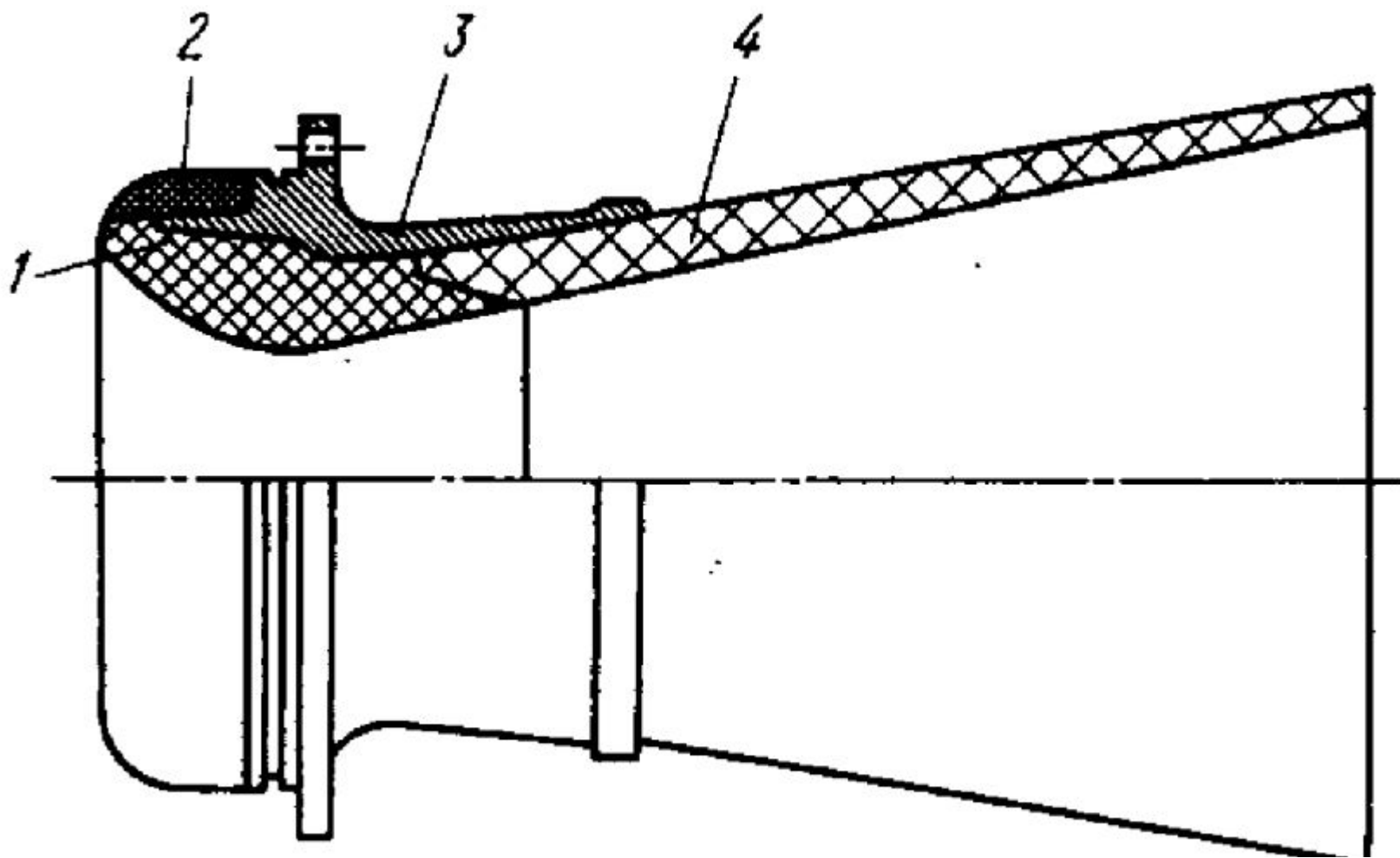
Подсистемы





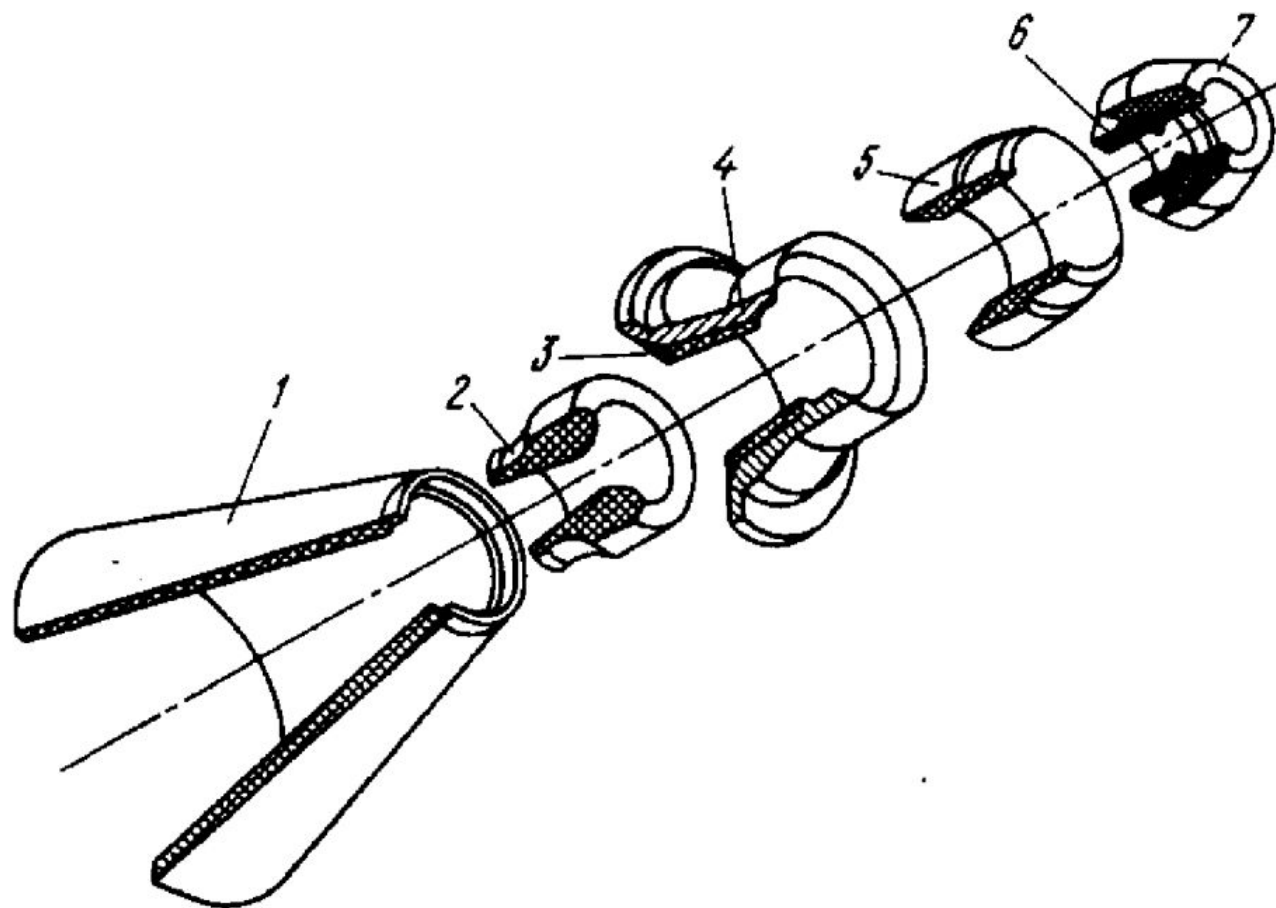
**Рис. 1.2.** Конструктивная схема маршевого РДТТ:

*a* — второй ступени МБР «Трайдент-1»; *б* — третьей ступени МБР «МХ»; *1* — передний фланец; *2* — корпус; *3* — заряд ТТ; *4* — сопловой блок; *5* — эластичный шарнир; *6* — растроб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка растроба сопла



**Рис. 6.14.** Схема конструкции соплового блока с моноблочной критической вставкой:

1 – моноблочная критическая вставка (УУКМ); 2 – защитный экран (углепластик); 3 – корпус (титан); 4 – раструб сопла (УУКМ)

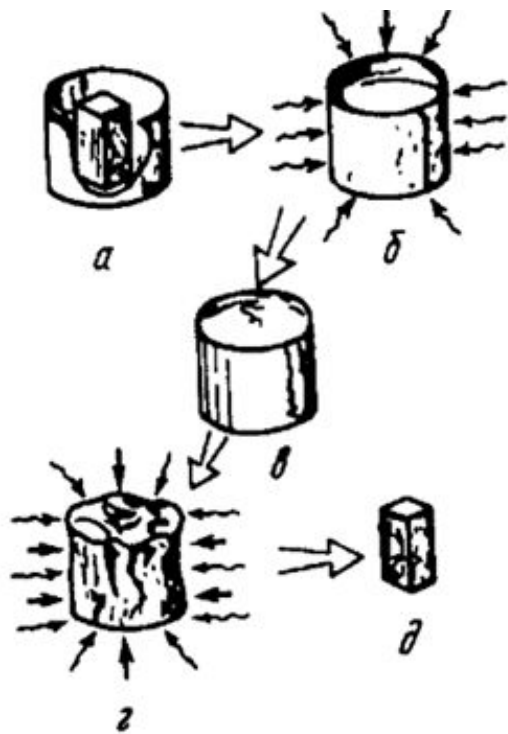


## Сопловый блок РДТТ:

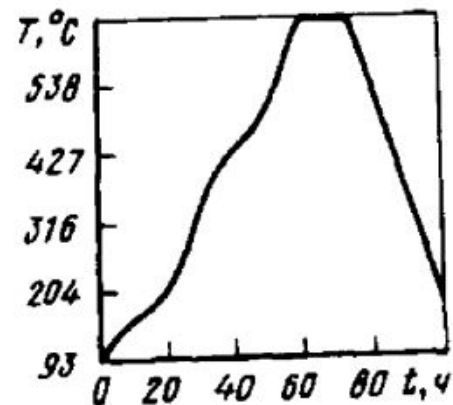
1 — раструб; 2 — критическая часть моноблока; 3 — ТЗП; 4 — соединительный фланец; 5 — экран; 6 — уплотнение; 7 — воротник



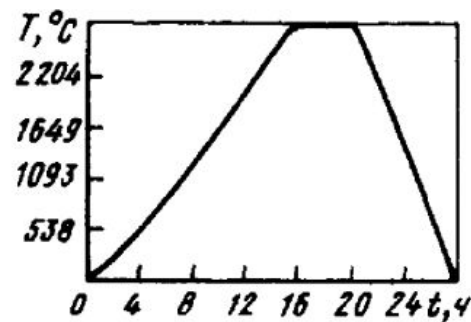
# Технология жидкофазной пропитки под давлением



**Рис. 1.39.** Последовательность операций цикла уплотнения под давлением:  
*a* — подготовка образца; *б* — пропитка; *в* — герметизация и откачка контейнера; *г* — карбонизация; *д* — очистка образца

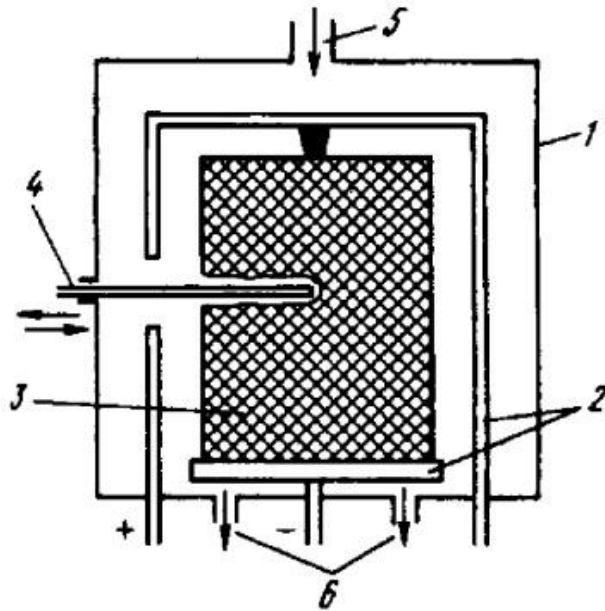


**Рис. 1.36.** Характерный цикл карбонизации



**Рис. 1.37.** Характерный цикл графитизации

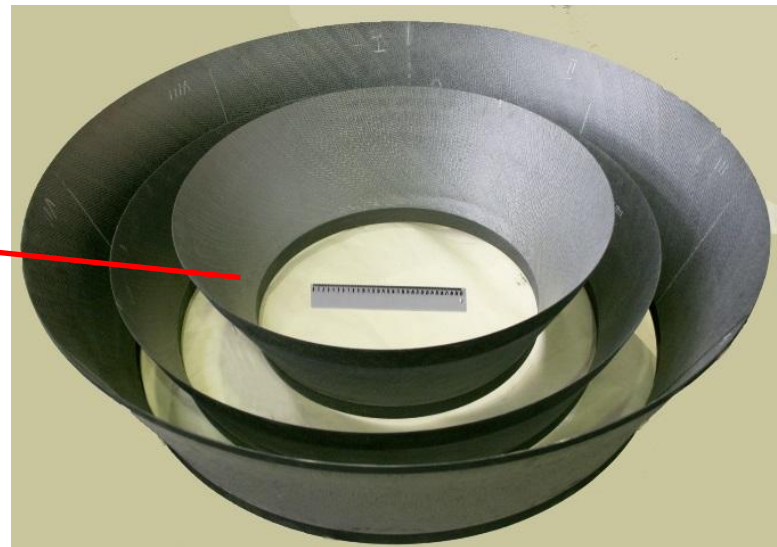
# Газофазное получение УУКМ



**Рис. 1.41.** Схема печи для осаждения пироуглерода по методу температурного градиента:  
1 – корпус печи; 2 – тоководы; 3 – изделие; 4 – термопара; 5 – ввод углеводорода; 6 – выход продуктов реакции



# Узлы РДТТ из УУКМ



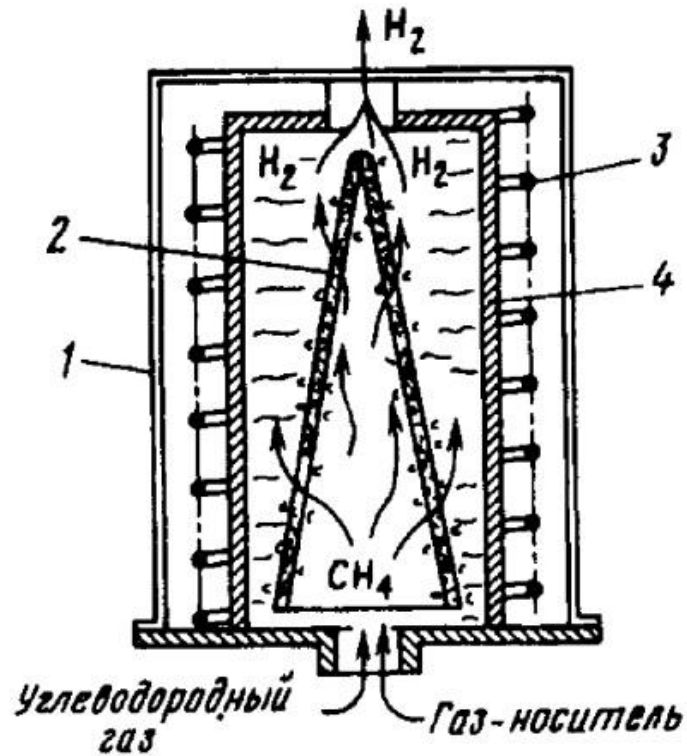
Внешний вид демонстратора соплового  
вкладыша РДТТ  
из УУКМ марки МКУ4М-7-У

### Материалы для конструкций входных трактов сопловых блоков

Элемент конструкции	Марка материала, страна	Метод изготовления	Механические характеристики			Теплофизические характеристики	
			$\sigma_T^+$ , МПа	$\sigma_1^-$ , МПа	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha$ , 1/К
Моноблок	КИМФ-МБ, Россия	УУКМ на основе каркаса 3D и пироуглеродной матрицы. Каркас изготовлен методом плетения высокомодульного жгута УКН-5000	50	160	1,85	5-15	—
Моноблок	Sercarb-570, США	УУКМ на основе каркаса 3D из углеродных стержней. Многоцикловое уплотнение с использованием нефтяного пека, графитизация	51	160	2,01	5-15	—

Элемент конструкции	Марка материала, страна	Метод изготовления	Механические характеристики			Теплофизические характеристики	
			$\sigma_T^+$ , МПа	$\sigma_1^-$ , МПа	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha$ , 1/К
Вкладыш критического сечения	УПА-3, Россия	Вязаный углеродный каркас, насыщенный пироуглеродом	5,6	22	1,97	11,5	$5 \cdot 10^{-6}$
То же	Десна, Россия	Плетеный каркас 3D с матрицей из графитизированного пекового кокса, многократная пропитка под давлением, графитизация	40,0-50,0	160	1,95	3-4	$2,5 \cdot 10^{-6}$
" "	Ругасарт-903, США	Стержневый каркас 3D с матрицей из графитизированного пекового кокса, многократная пропитка, графитизация	25	155	1,95	—	—

# Газофазное получение УУКМ



**Рис. 1.40.** Схема камеры для изотермического процесса химического осаждения:

1 — кожух; 2 — углеродный каркас; 3 — индукционная катушка; 4 — графитовый сердечник

## УУКМ для изготовления раструбов РДТТ

Марка материала	Каркас раструба		Матрица	Основные характеристики	
	Структура	Наполнитель		$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_1^+$ , МПа
Куп-ВМ-ПУ	Намоточная	Нить ВМН	Кокс фенолформальдегидной смолы, пироуплотнение	1,4	—
Заря	Каркас изготавливается на круглоткацкой машине	Основа — нить Урал-24 Уток — нить УКН-5000	Пироуплотнение	1,4	58



ТВП-КМ	Ткане- выкладоч- ная прошивная	Ткань Урал- ТМ-4-22	Кокс фенолформальде- гидной смолы, пироуплотнение	1,4	70
ТВП Луч	То же Ткане- выкладоч- ная прошивная	То же Ткань УТ-900	Пироуплотнение То же	1,4	60
Луч КМ	То же	То же	Кокс фенолформальде- гидной смолы, пироуплотнение	1,5-1,5	90
				1,5-1,6	130

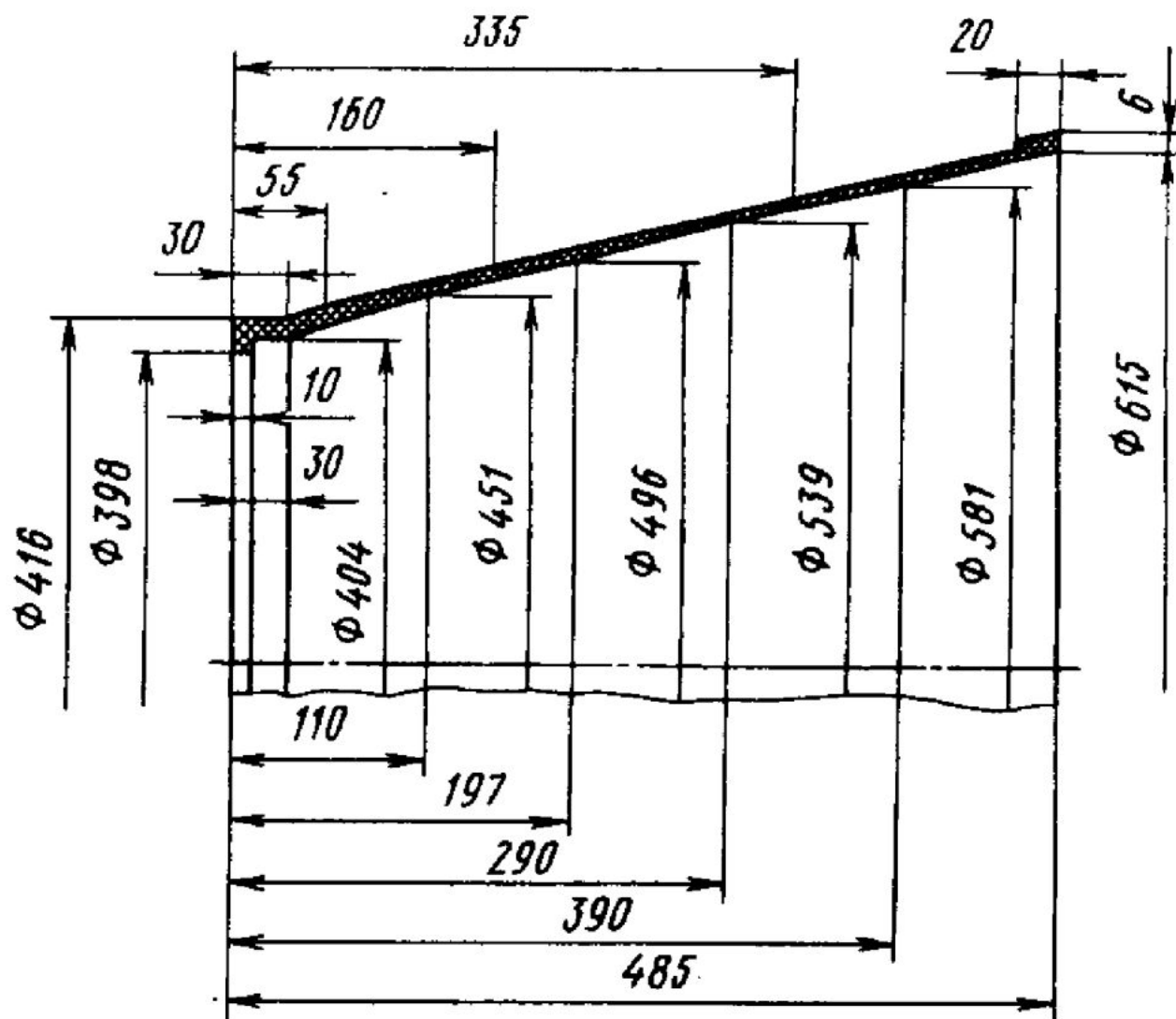
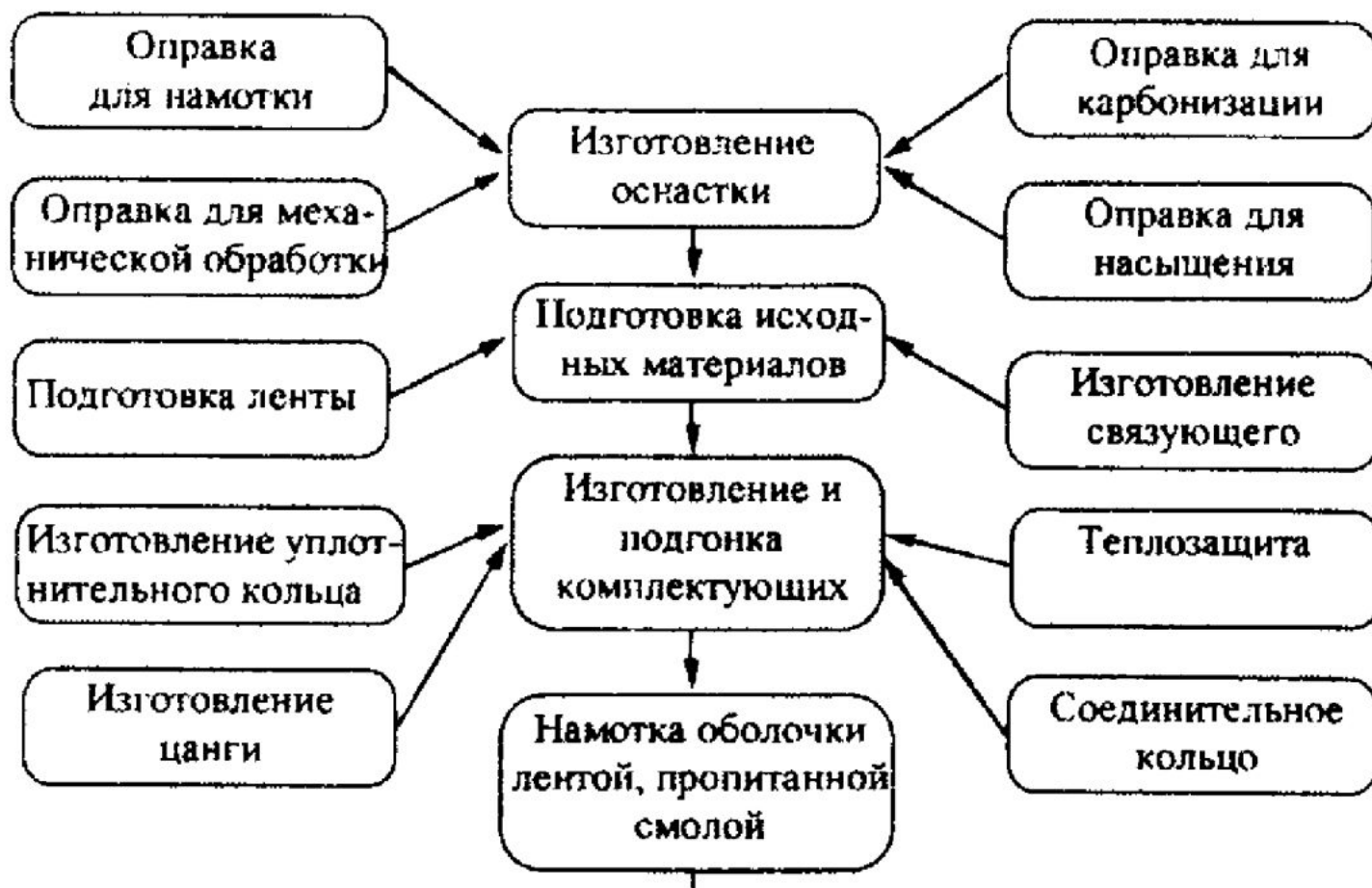


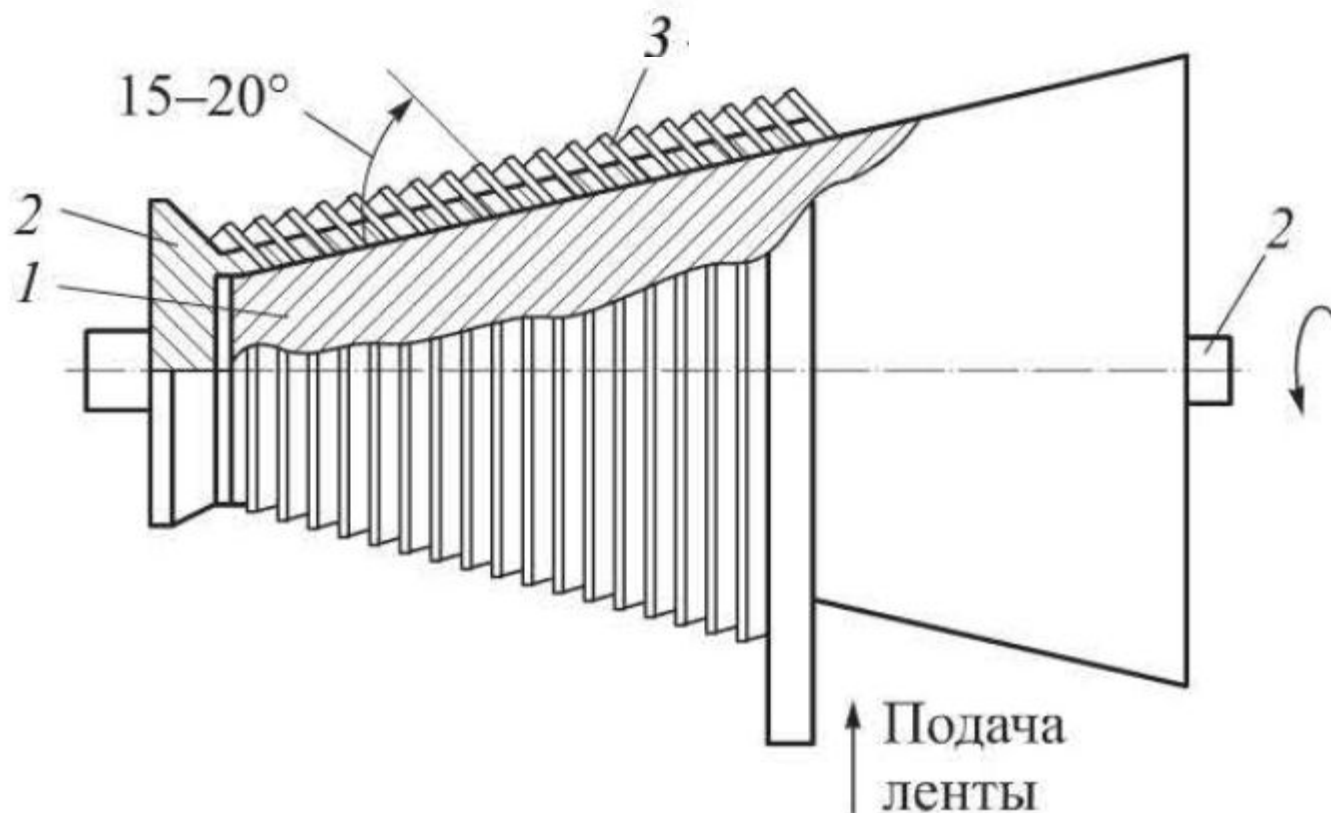
Рис. 6.17. Конструктивная схема насадки

## Структурная схема технологического процесса изготовления насадка



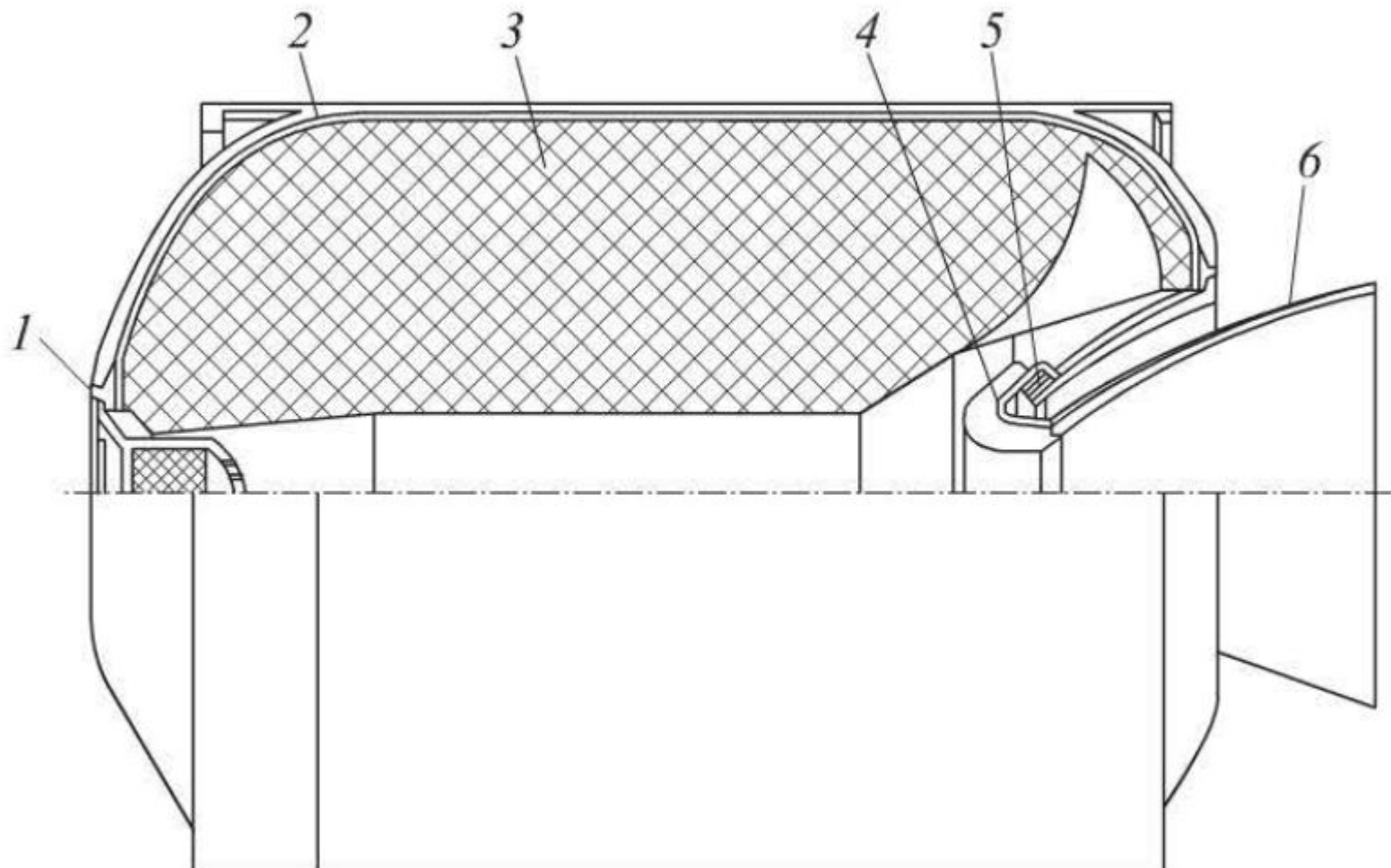


## Схемы «кровельной» намотки абляционного теплозащитного покрытия на технологическую оправку



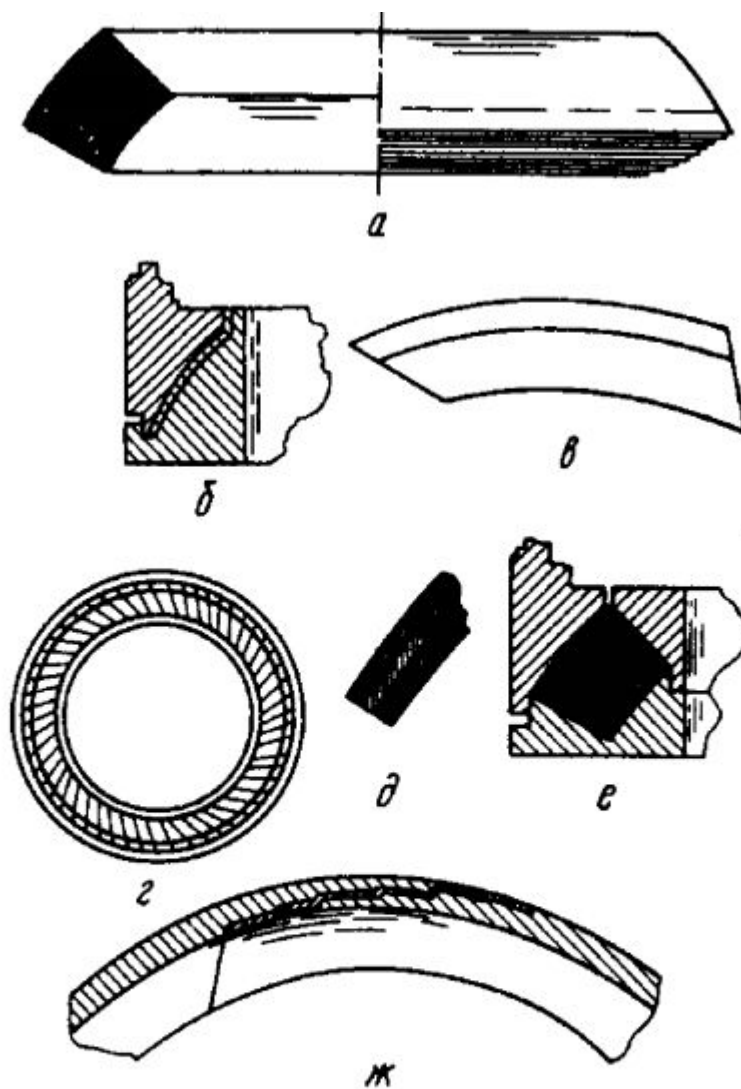
*1* — конструктивная или технологическая оправка для намотки; *2* — цапфы крепления оправки на станке; *3* — **наматываемое покрытие**





**Рис. 1.2.** Конструктивная схема маршевого РДТТ:

*a* — второй ступени МБР «Трайдент-1»; *б* — третьей ступени МБР «МХ»; *1* — передний фланец; *2* — корпус; *3* — заряд ТТ; *4* — сопловой блок; *5* — эластичный шарнир; *6* — раструб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка раструба сопла



**Рис. 6.20.** Многослойный эластичный сферический шарнир:  
*a* – типовая конструкция; *б* – процесс изготовления тарели; *в* –  
 сегмент; *г* – пакет сегментов; *д* – схема сборки тарели в пакет;  
*е* – опрессовка; *ж* – схема расположения слоев ткани в стенке  
 тарели



# Применение ПКМ в РДТТ

