

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



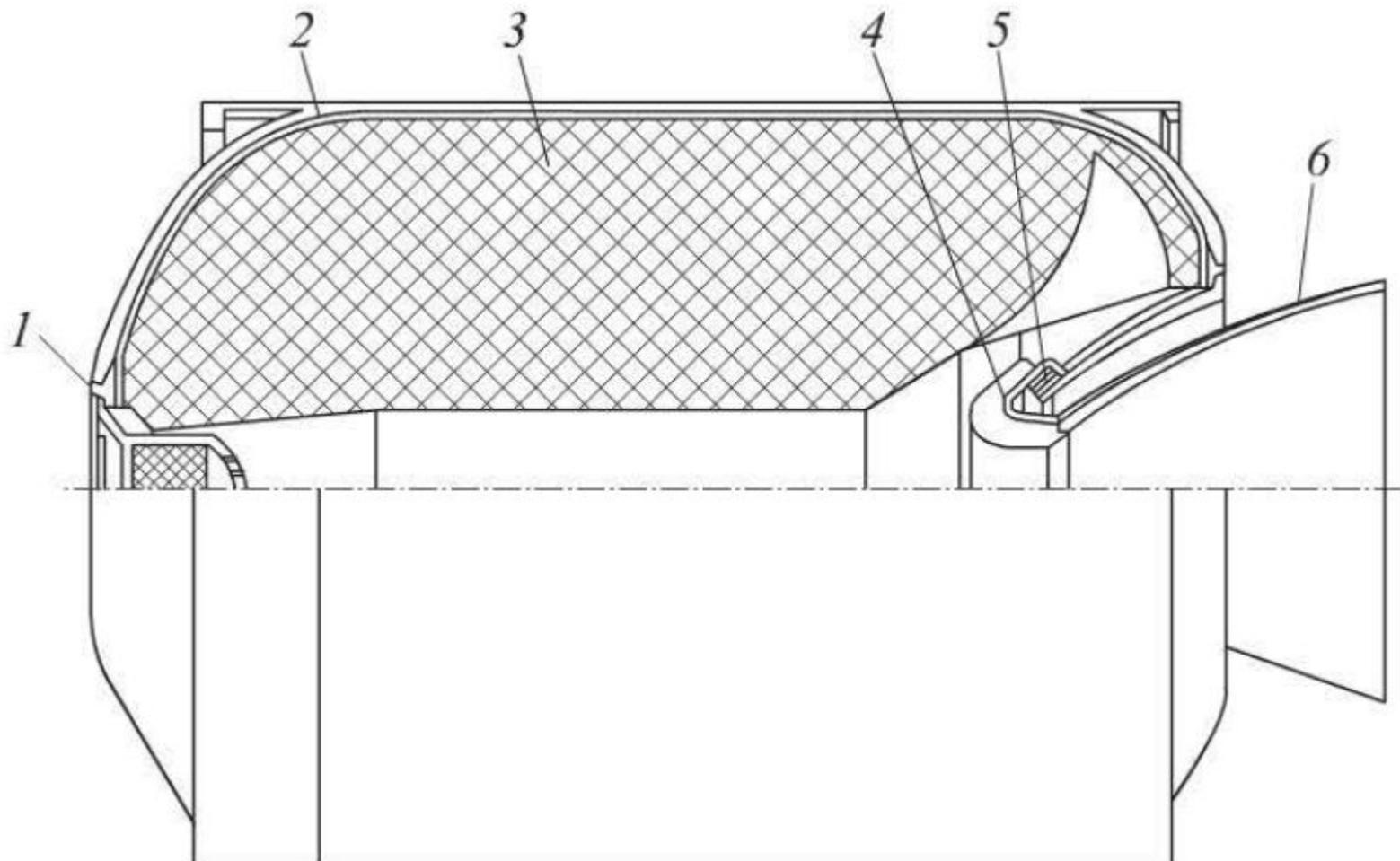


Рис. 1.2. Конструктивная схема маршевого РДТТ:

а — 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

Системы

Подсистемы



Мокрая намотка

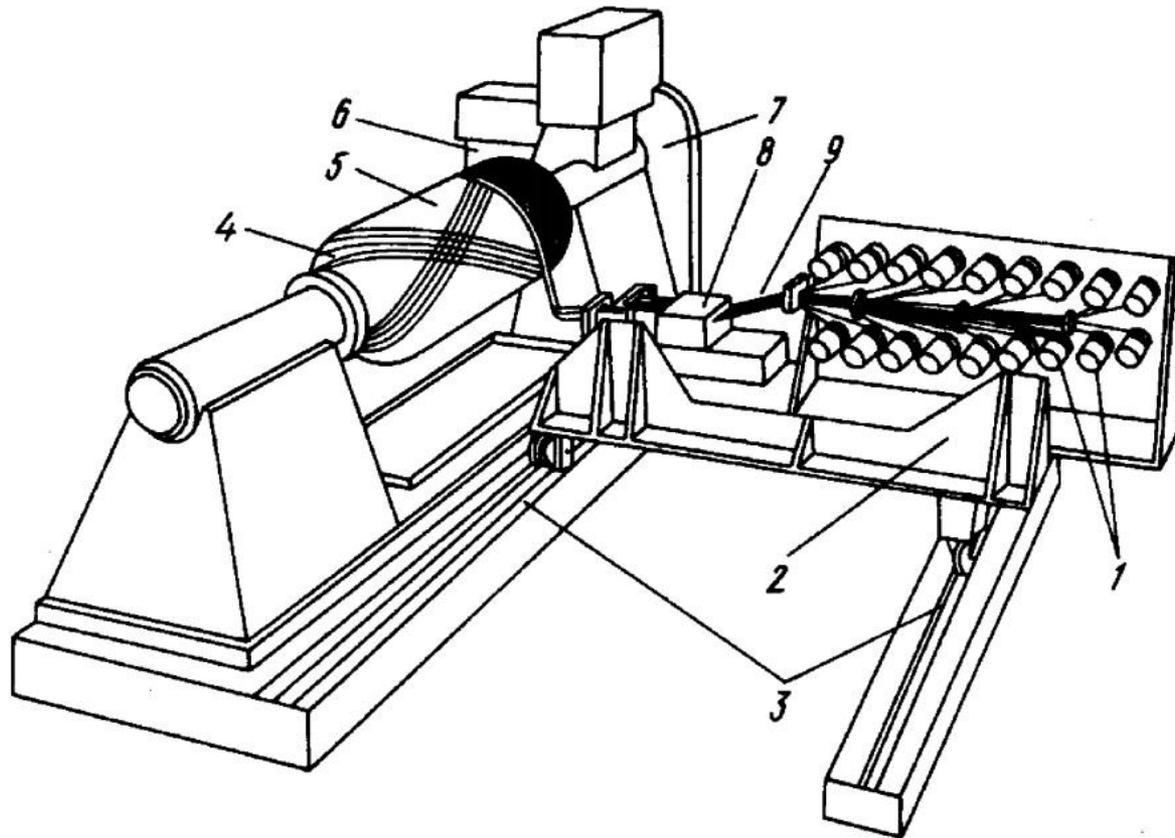


Рис. 2.31. Схема “мокрой” намотки:
1 – шпули с нитями; 2 – шпулярник; 3 – направляющие перемещения намоточно-пропиточного тракта; 4 – спиральные слои; 5 – оправка; 6 – окружные слои; 7 – привод вращения; 8 – ванночка со связующим; 9 – сформированная пряжа

Намотка препрегом



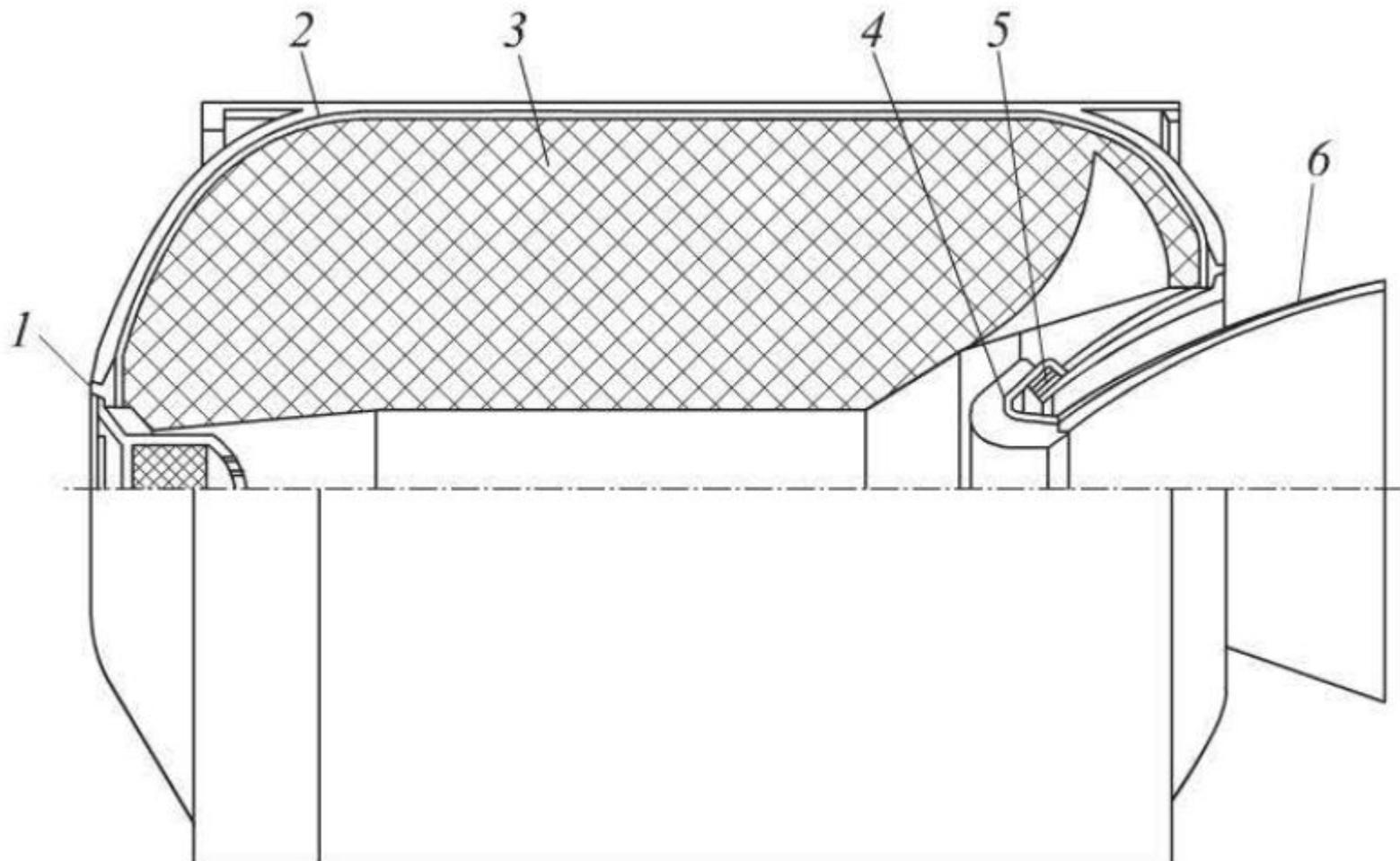


Рис. 1.2. Конструктивная схема маршевого РДТТ:

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* — растроб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка растроба сопла

Резка каучука

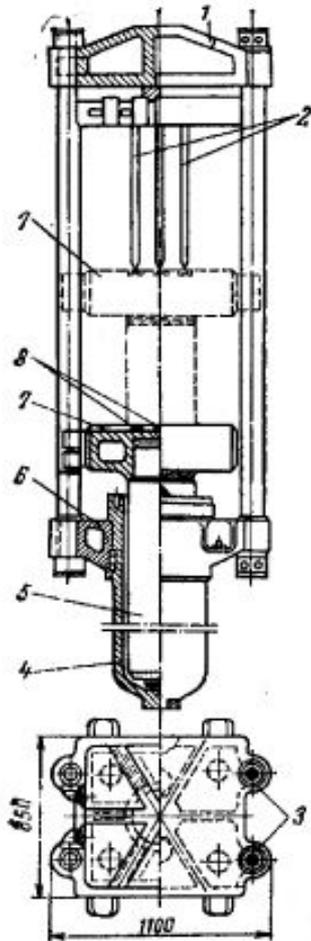


Рис. 23.1. Вертикальный нож с гидравлическим приводом:

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.

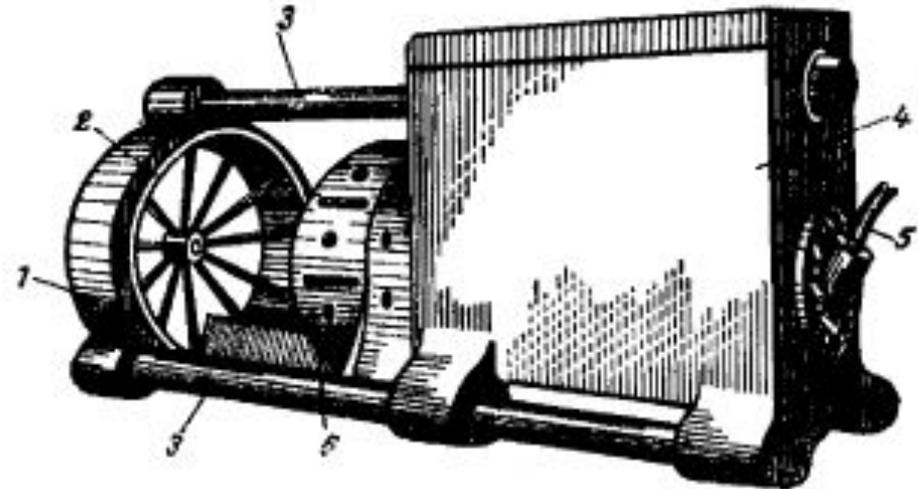


Рис. 23.2. Горизонтальный нож для резки НК:
1—траверса; 2—головка с десятью ножами; 3—направляющие; 4—резервуар для масла; 5—трубопровод для подачи масла; 6—толкатель.

Пластикация каучука на вальцах

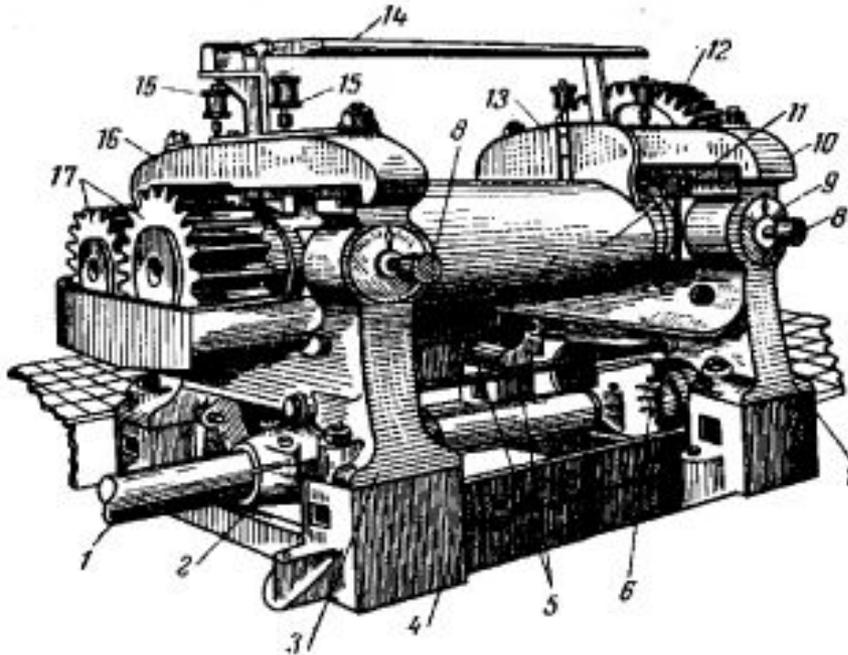


Рис. 23.4. Вальцы:

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

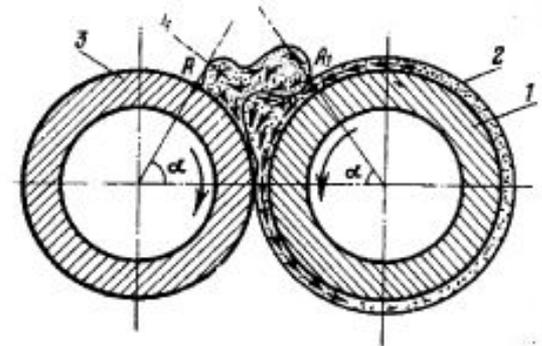


Рис. 23.5. Схема определения угла захвата α валков:

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

Пластикация каучука в резиносмесителе

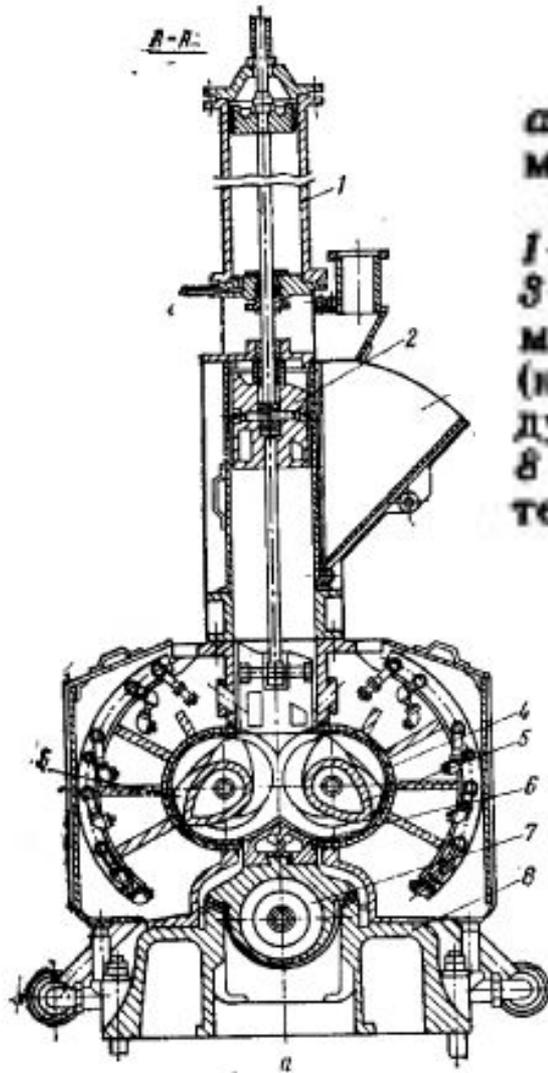
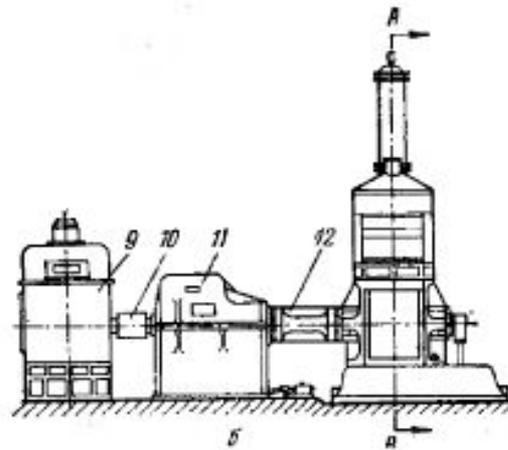


Рис. 23.6. Резиносмеситель 250-40:
а — поперечный разрез через рабочую камеру;
б — внешний вид резиносмесителя с электродвигателем и редуктором;
1 — воздушный цилиндр; 2 — верхний затвор;
3 — загрузочная воронка; 4 — рабочая камера;
5 — роторы; 6 — откидная дверца (нижний затвор); 7 — горизонтальный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



Каландрование каучука

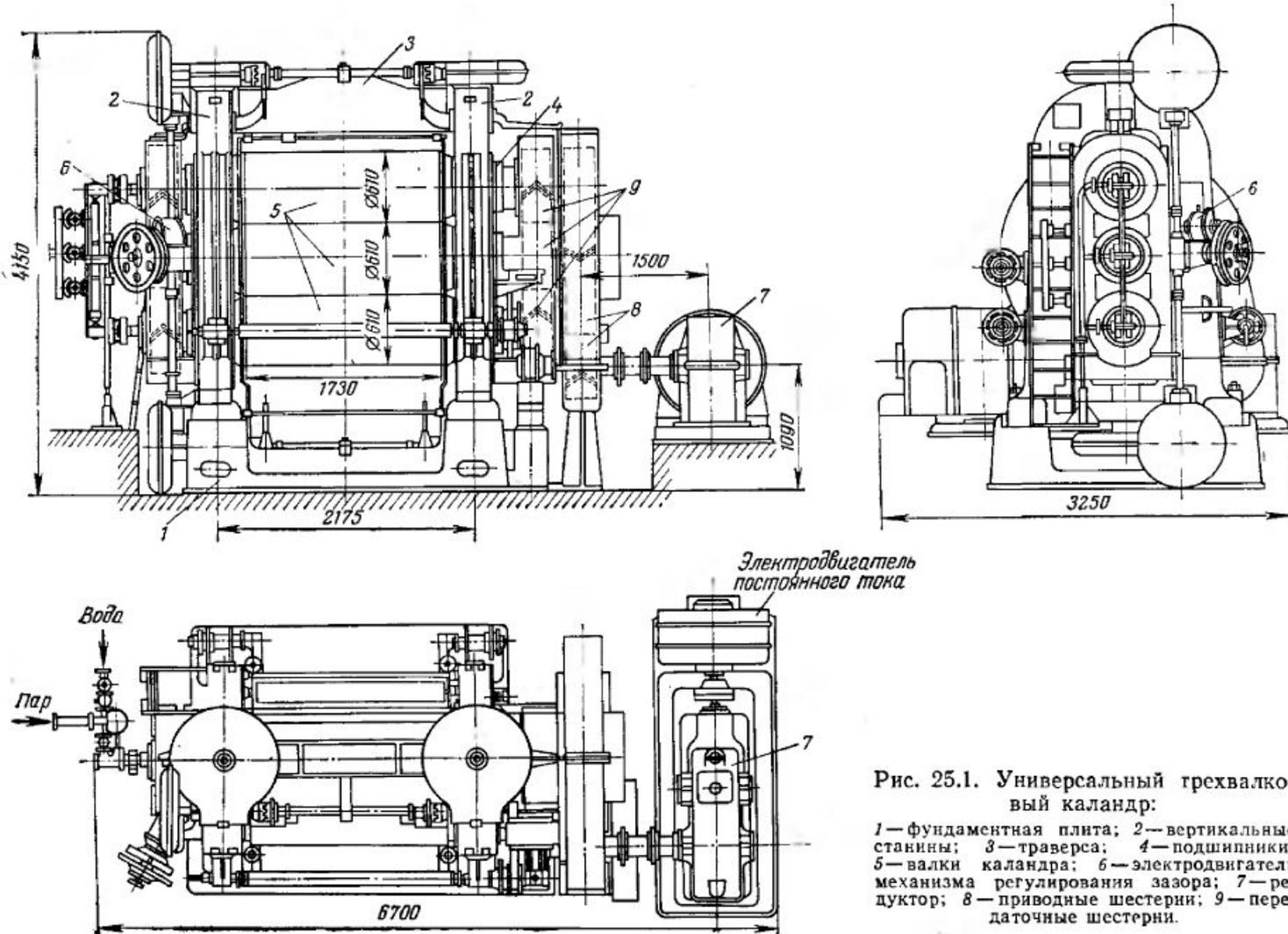


Рис. 25.1. Универсальный трехвалковый каландр:

- 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.

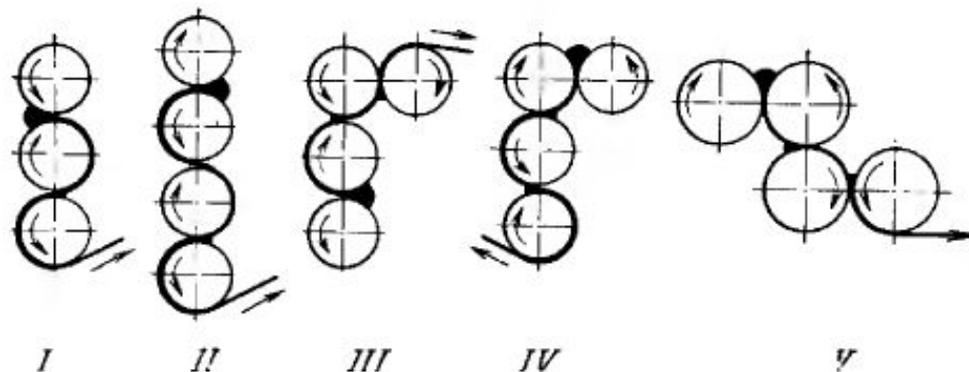
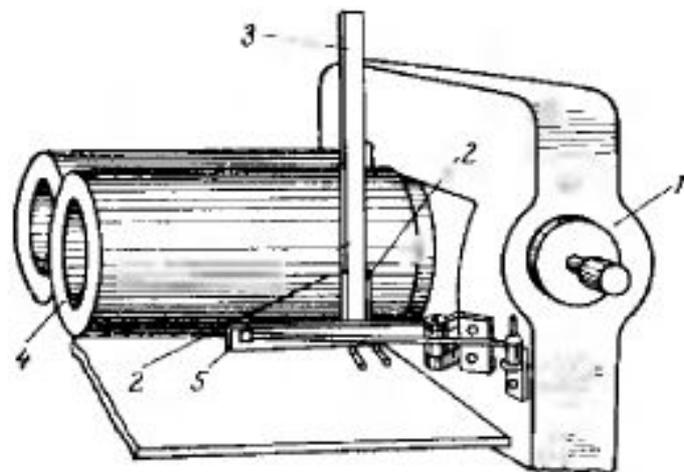


Рис. 25.2. Листование резиновых смесей на различных каландрах:
 I — трехвалковым; II — четырехвалковым; III, IV — четырехвалковым с выносным валком;
 V — четырехвалковым с Z-образным расположением валков.

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

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



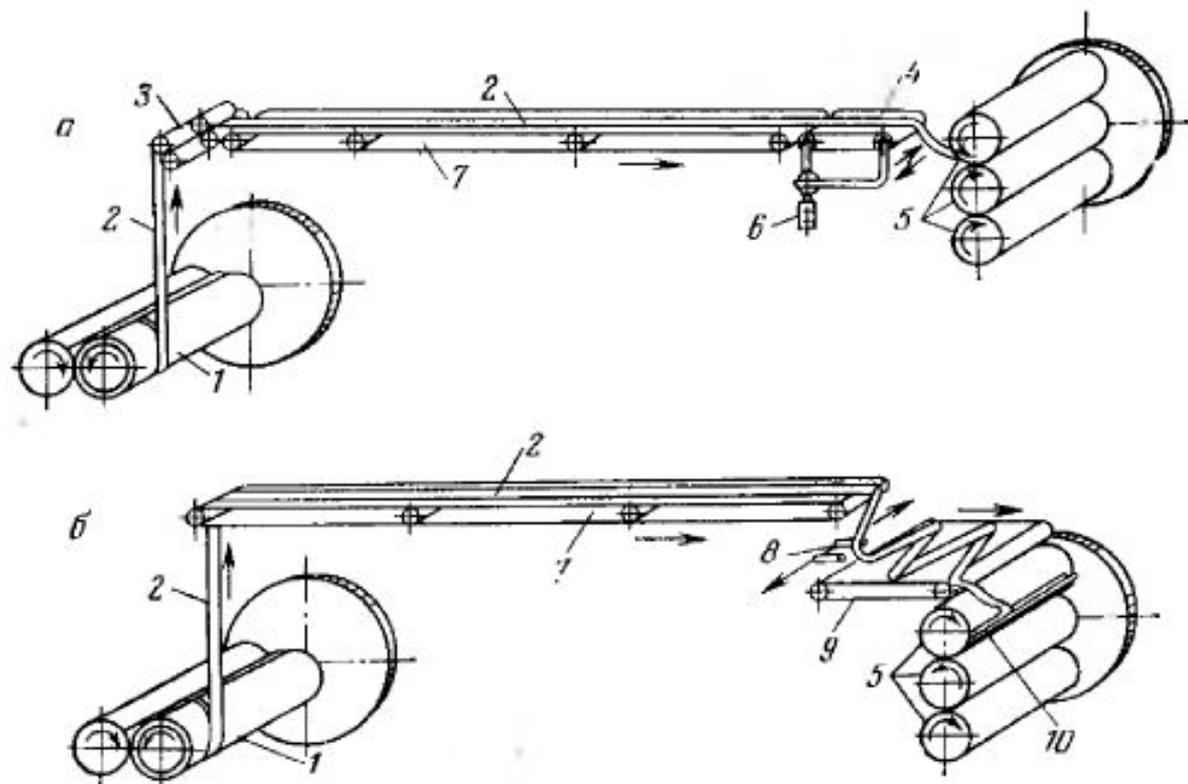


Рис. 25.4. Схемы непрерывного питания трехвалкового каландра с распределением резиновой смеси по поверхности валка каландра с помощью качающегося транспортера (а) или распределительных роликов и дополнительного ленточного транспортера (б):

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.

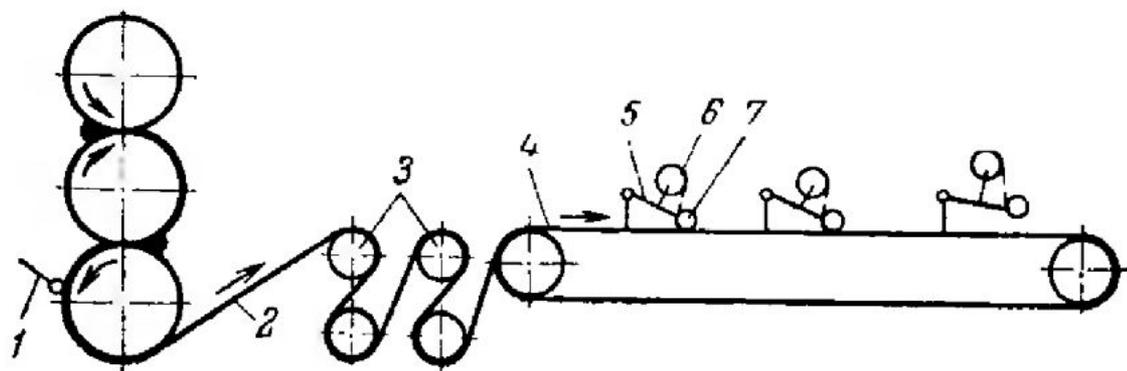


Рис. 25.5. Схема листования резиновых смесей на трехвалковом каландре:
 1—ножи для закроя полос резиновой смеси; 2—полоса листованной резиновой смеси;
 3—охлаждающие барабаны; 4—закаточный транспортер; 5—рычажное закатывающее устрой-
 ство; 6—рулон с прокладочным полотном; 7—рулон листованной резины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

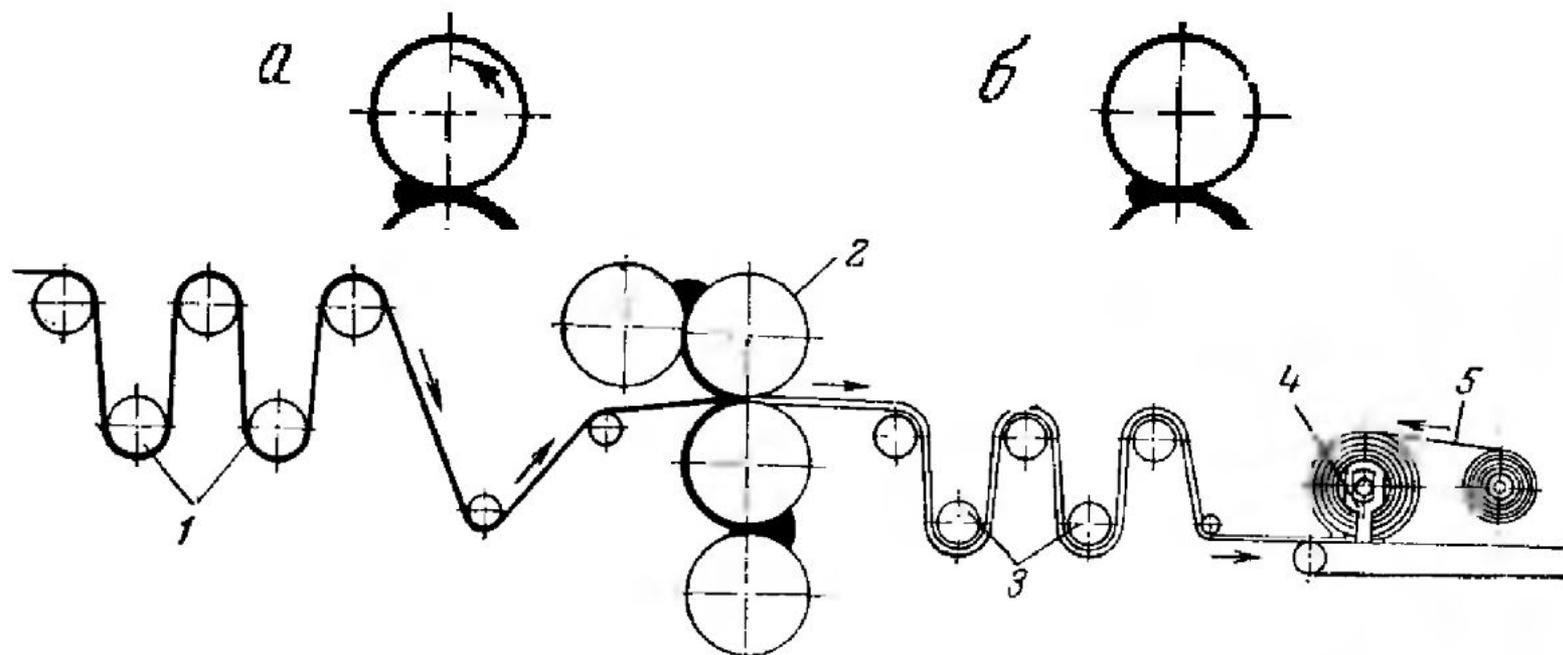


Рис. 25.10. Схема двухсторонней обкладки тканей:

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.

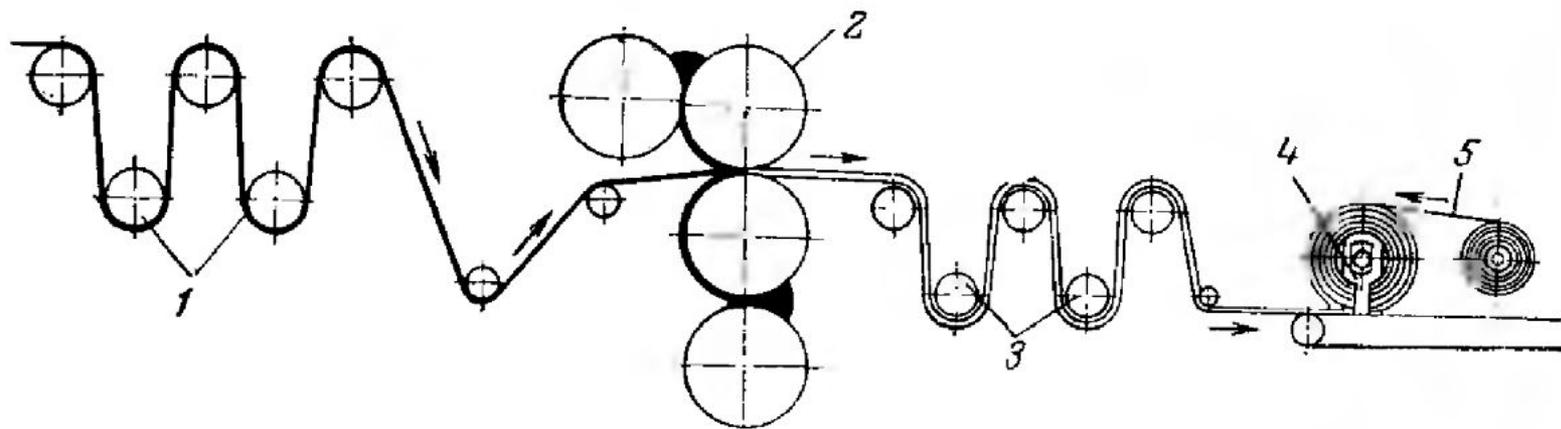


Рис. 25.10. Схема двухсторонней обкладки тканей:
 1—сушильные барабаны; 2—четырёхвалковый каландр; 3—охлаждающие барабаны; 4—зака-
 точное устройство; 5—прокладка.

Свойства некоторых типов ТЗМ

Свойство	Тип				
	51-2058	51-2110	51-2101	АФК-В	КНК
Плотность, 10^{-3} кг/м ³	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 ² /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 ⁻¹	115–145	210–255	103–141	10	75–105
Коэффициент Пуассона	0,39	0,45	—	0,21	0,47
Параметр эффективности, см ² × 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 ³	0,86	0,89	0,80	—	—

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

Подсистемы

Системы



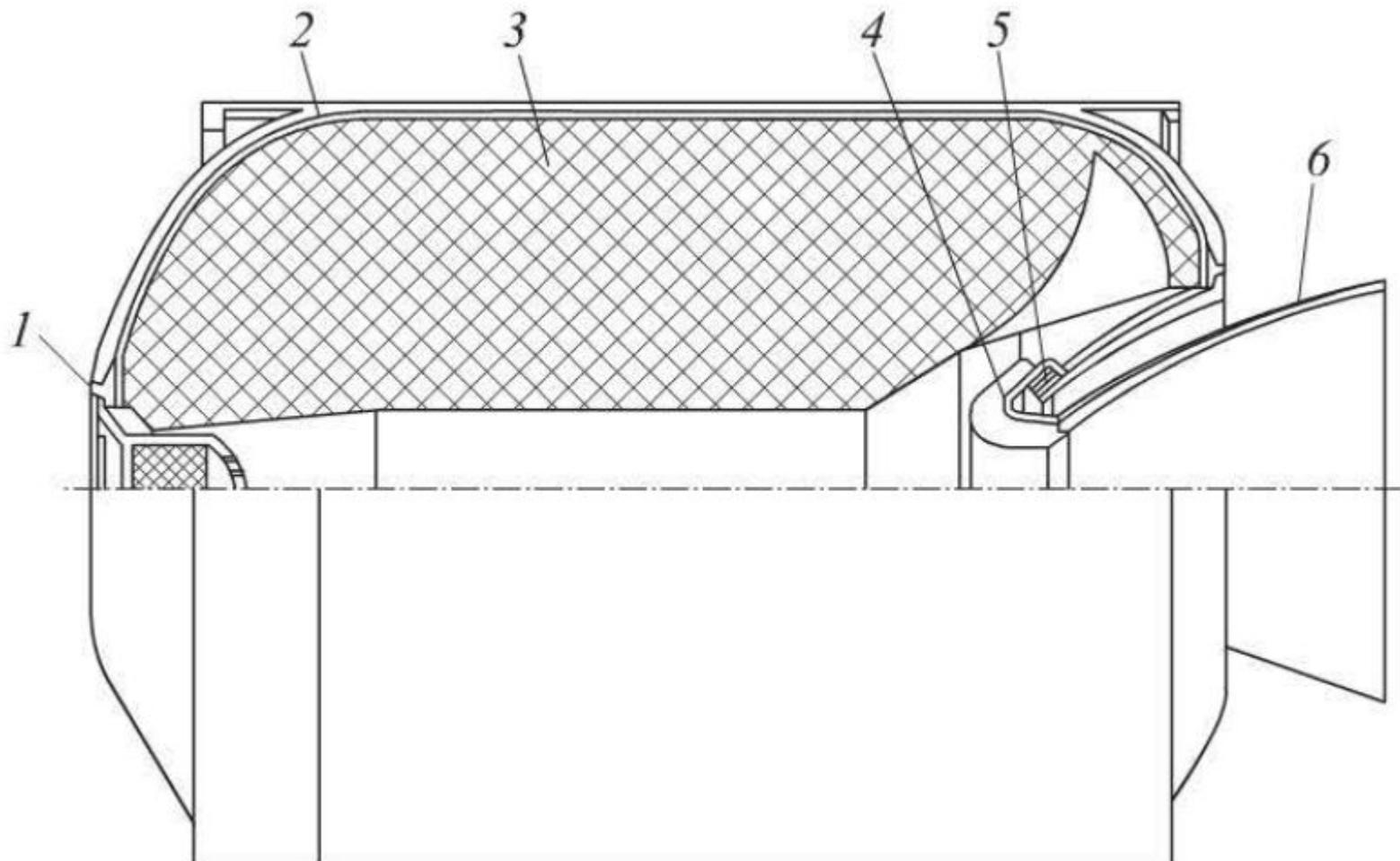
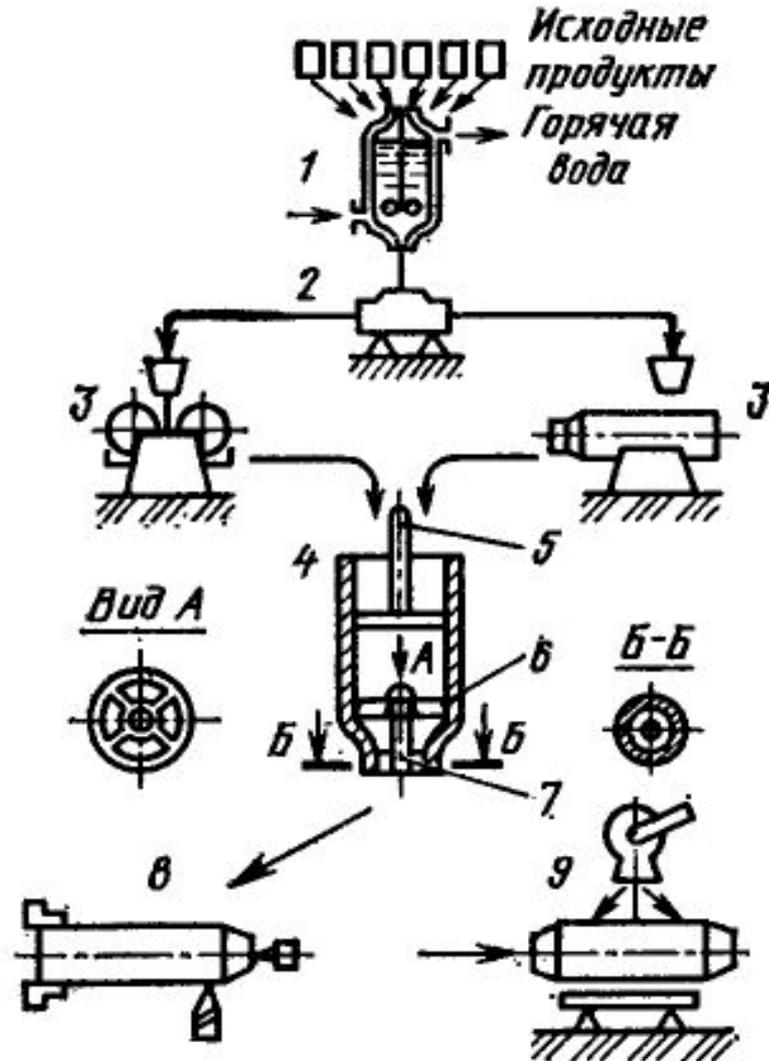


Рис. 1.2. Конструктивная схема маршевого РДТТ:

a — второй ступени МБР «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

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

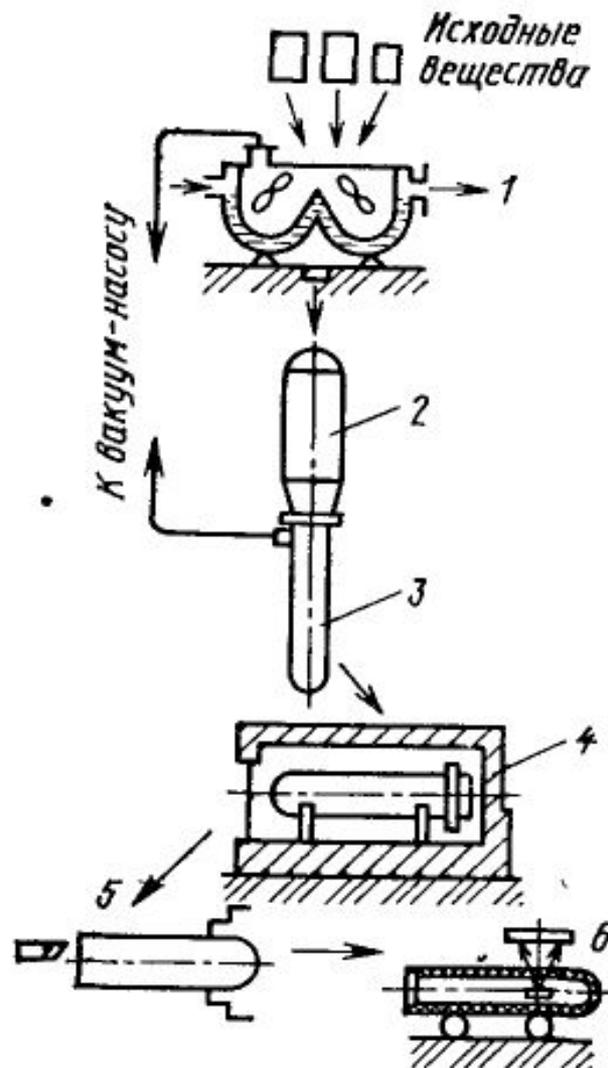
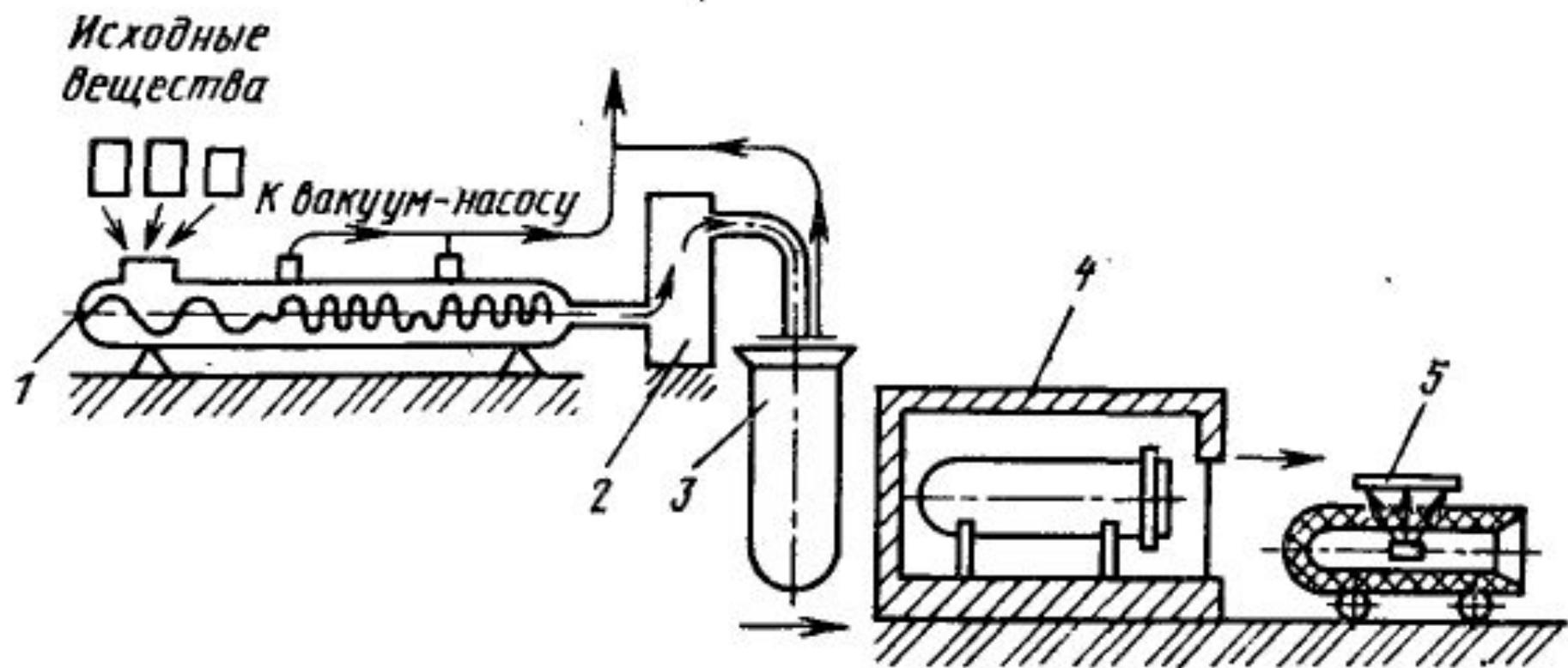


Схема изготовления топливного заряда непрерывным способом:



- 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
Нитрат 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	Темперота сгорания, ккал/кг	Температура плавления, °С	Удельный вес, г/см ³	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



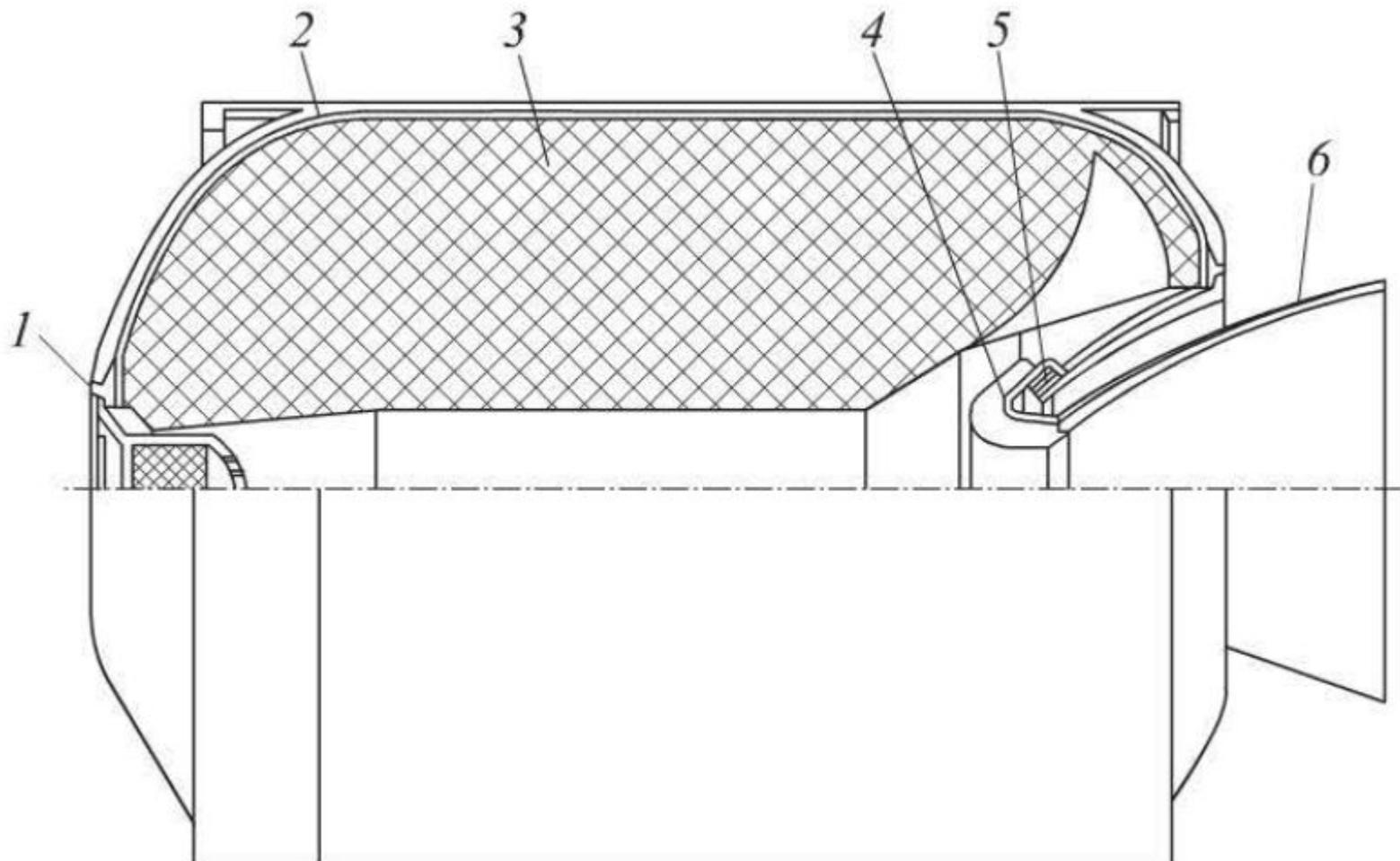


Рис. 1.2. Конструктивная схема маршевого РДТТ:

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

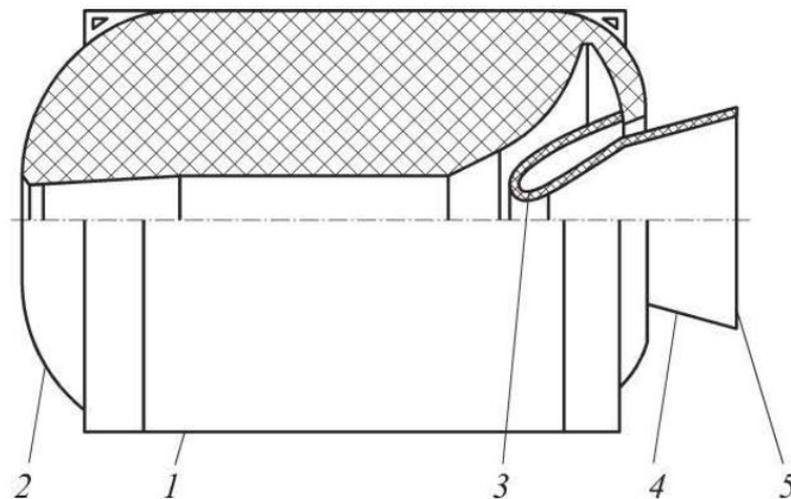


Рис. 2.15. Схема расположения характерных зон ракетного двигателя:

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

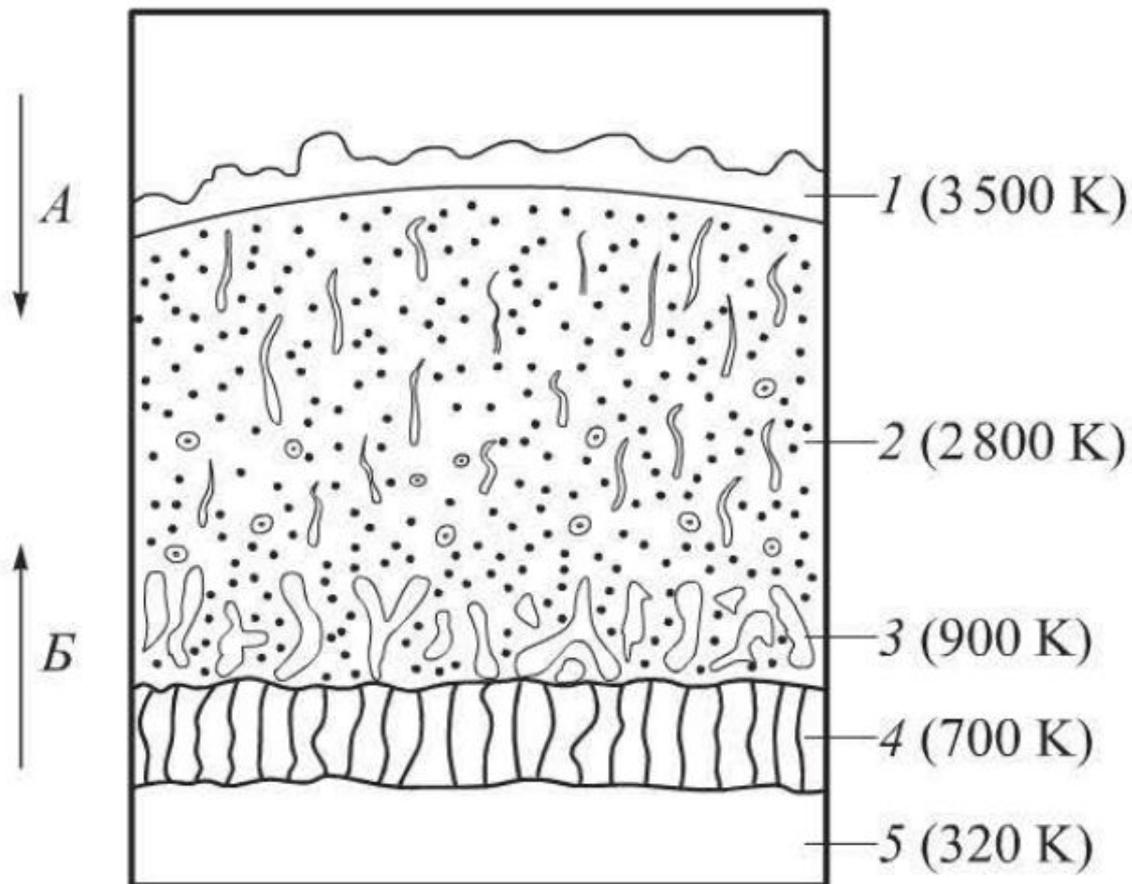
Таблица 2.35. Характеристики рабочего процесса РДТТ в различных зонах

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

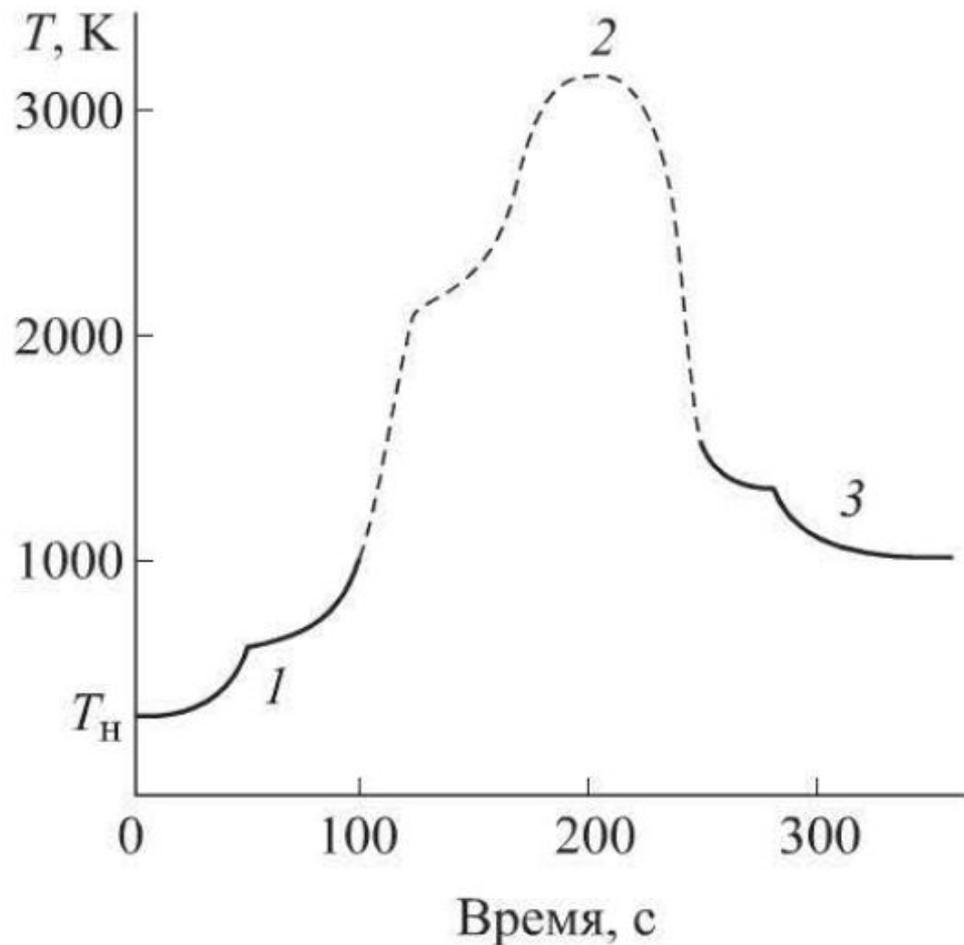


Рис. 2.13. Основные процессы, протекающие в работающем абляторе:
1 — деструкция связующего; *2* — пиролиз наполнителей; *3* — догорание кокса

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 см^2 , кВт/см²; \dot{m} — скорость потери массы материала с поверхности площадью 1 см^2 , кг/см².

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/м²**

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 ³	Удлинение при разрыве, %	Прочность, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	Температурный коэффициент линейного расширения ×10 ⁶ , 1/К	Скорость уноса массы, мм/с	Плотность теплового потока, Вт/м ²
				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)
<p>Внутренняя теплозащита стенок корпуса РДТТ и наружная теплозащита диафрагм, экранов, ферм и др.</p>	<p>0,2...4 (наполненные эластомеры); 1,4...9 (стеклопластики, асбопластики, органопластики, наполненные термопласты, углепластики)</p>
<p>Наружная теплозащита стенок корпуса головной части и спускаемого аппарата, входящих в плотные слои атмосферы Земли, стенки камер сгорания ЖРД небольшой тяги</p>	<p>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)</p>
<p>Наружная теплоизоляция стенок корпуса орбитального корабля типа «Шаттл»</p>	<p>25...70 (углерод-углеродный композиционный материал); 1...7 (пористый керамический композиционный материал на основе кварцевого волокна)</p>
<p>Стенки без теплозащиты и теплоизоляции</p>	<p>0,33...0,65 (алюминиевые сплавы); 0,7...0,85 (стали, титановые сплавы)</p>

Системы

Подсистемы



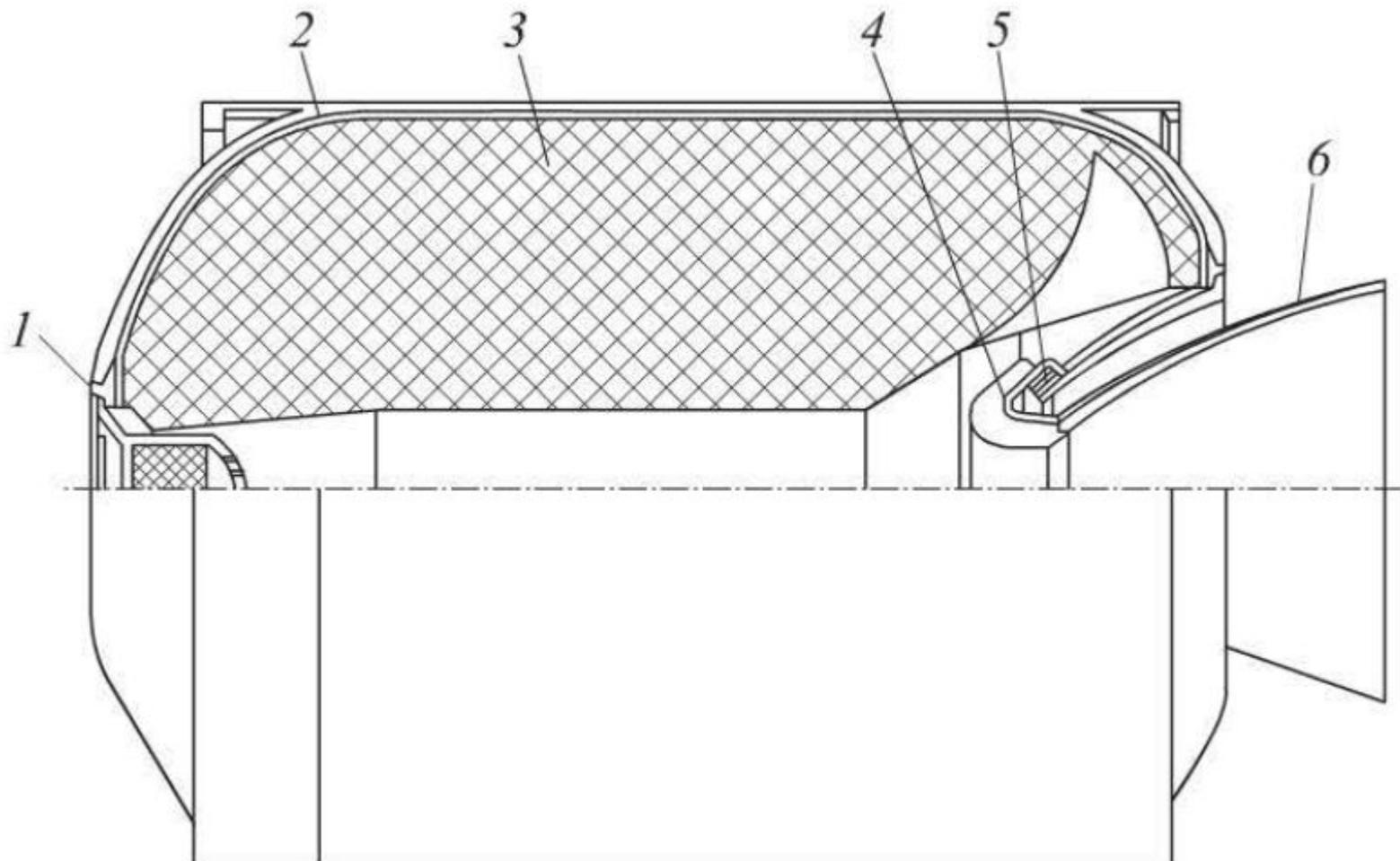


Рис. 1.2. Конструктивная схема маршевого РДТТ:

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* — раструб сопла; *7* — выдвигающиеся секции насадка раструба сопла

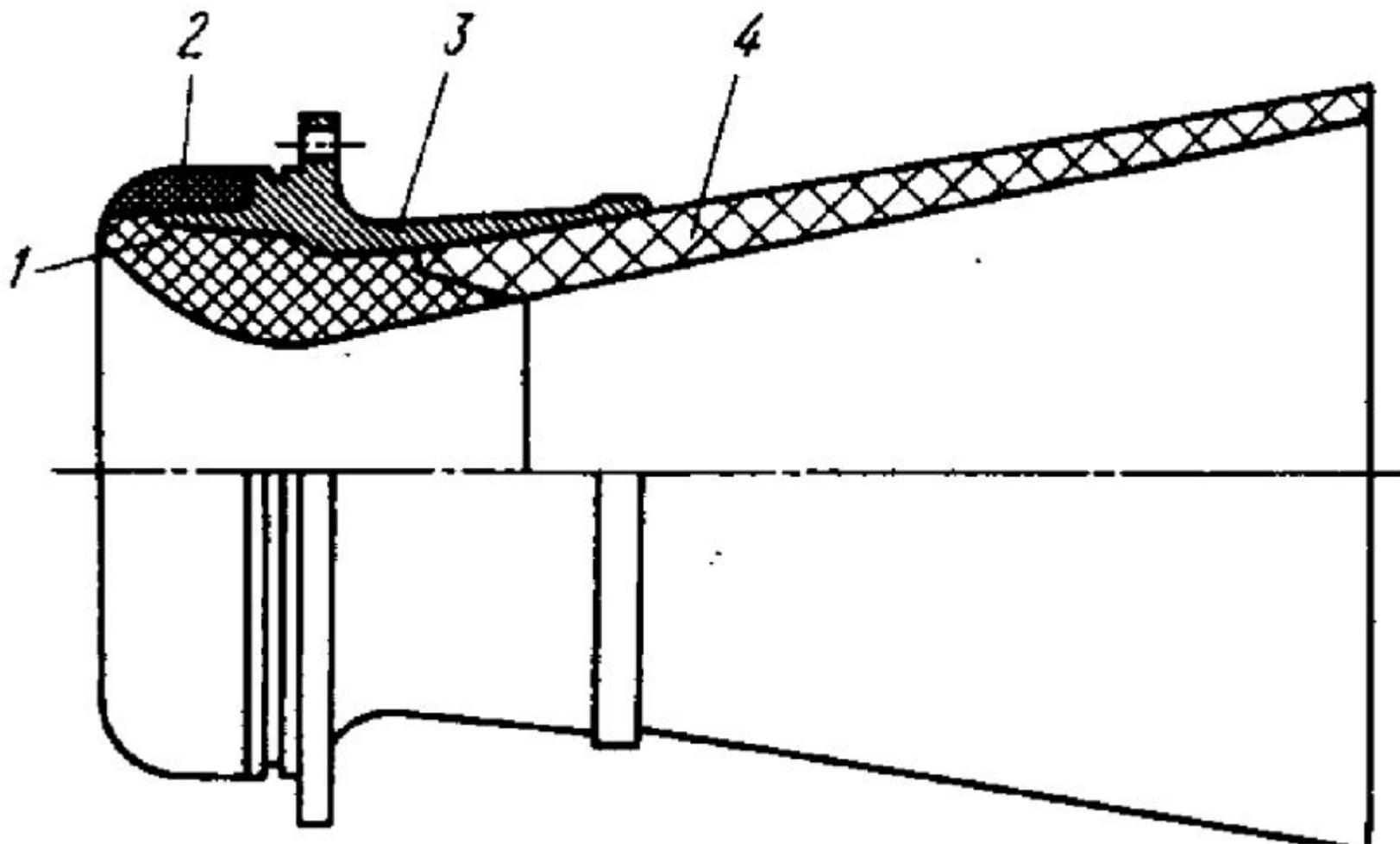
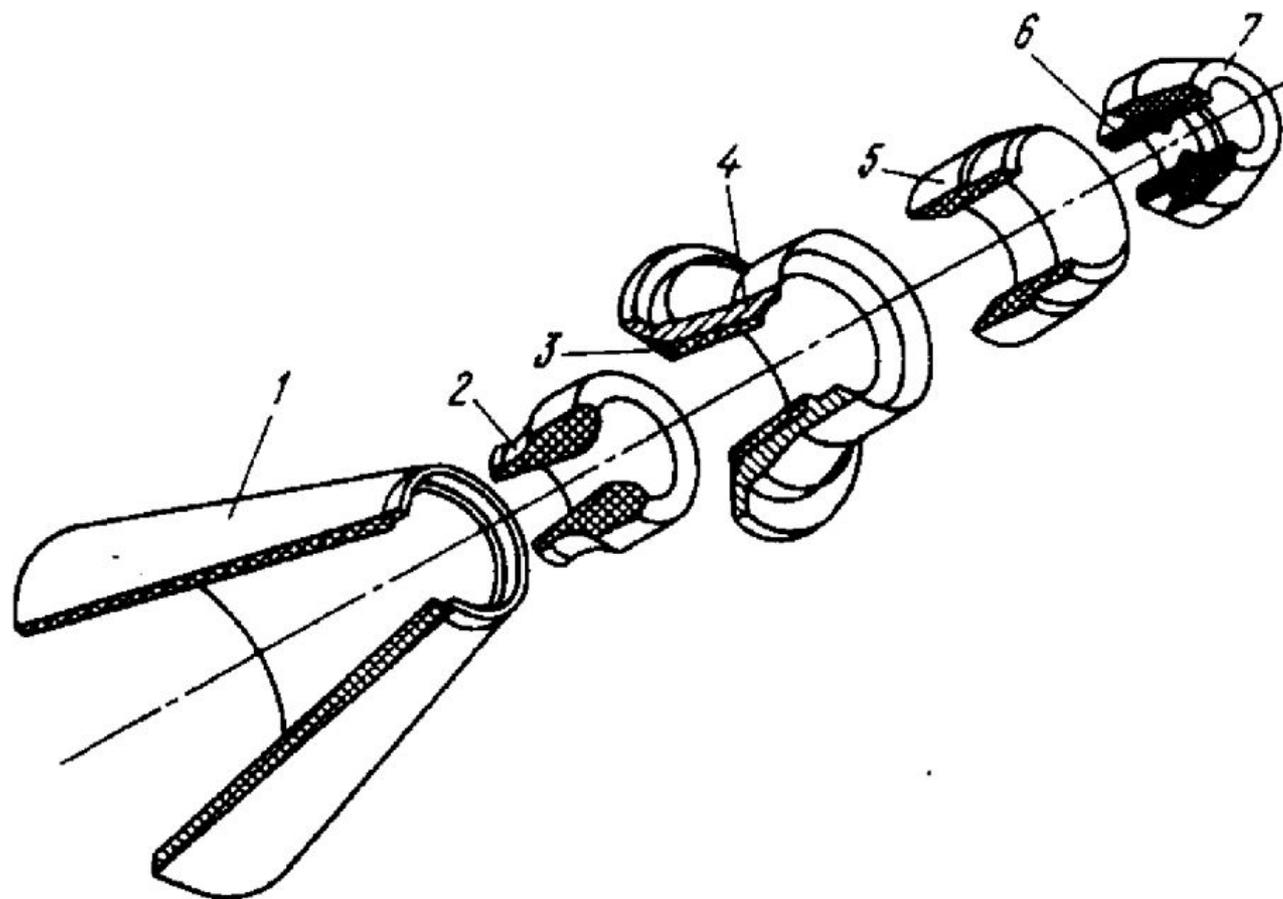


Рис. 6.14. Схема конструкции соплового блока с моноблочной критической вставкой:

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

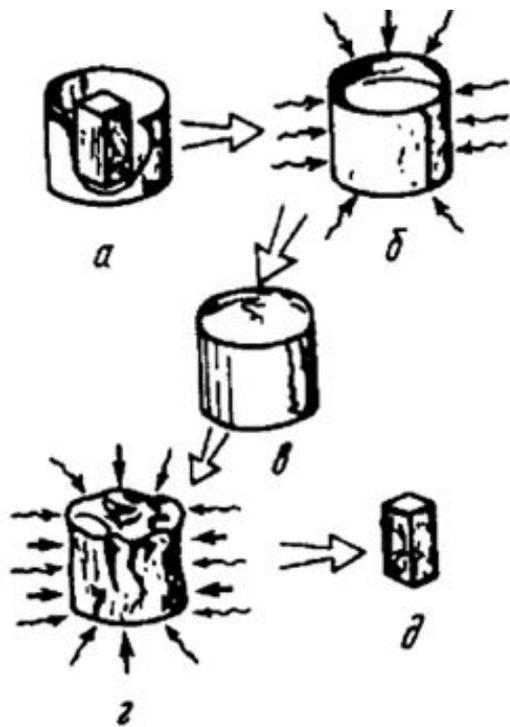


Рис. 1.39. Последовательность операций цикла уплотнения под давлением:
a — подготовка образца; *б* — пропитка; *в* — герметизация и откачка контейнера; *г* — карбонизация; *д* — очистка образца

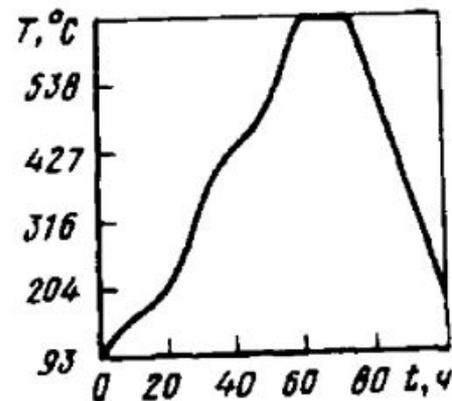


Рис. 1.36. Характерный цикл карбонизации

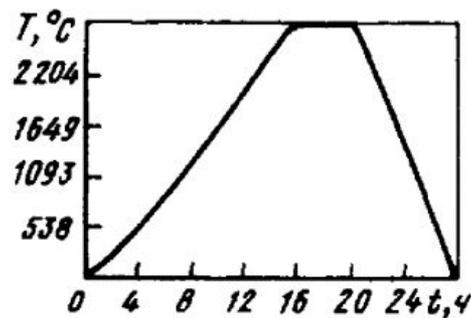


Рис. 1.37. Характерный цикл графитизации

Газофазное получение УУКМ

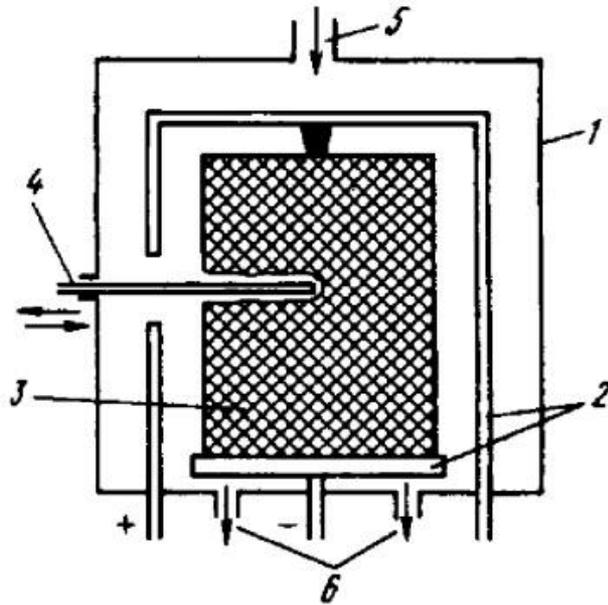
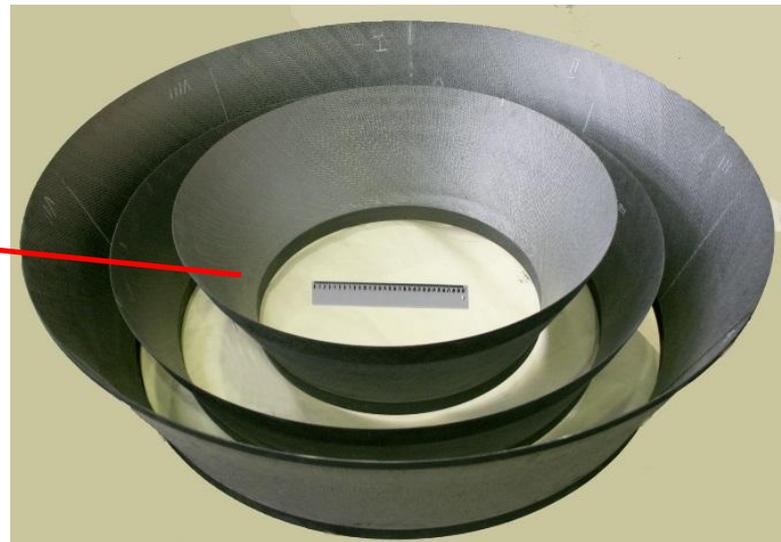


Рис. 1.41. Схема печи для осаждения пироуглерода по методу температурного градиента:
1 – корпус печи; 2 – тоководы; 3 – изделие; 4 – термопара; 5 – ввод углеводорода; 6 – выход продуктов реакции



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	
			σ_T^+ , МПа	σ_1^- , МПа	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	α , 1/К
Моноблок	КИМФ-МБ, Россия	УУКМ на основе каркаса 3D и пироуглеродной матрицы. Каркас изготовлен методом плетения высококомодульного 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	
			σ_T^+ , МПа	σ_1^- , МПа	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	α , 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

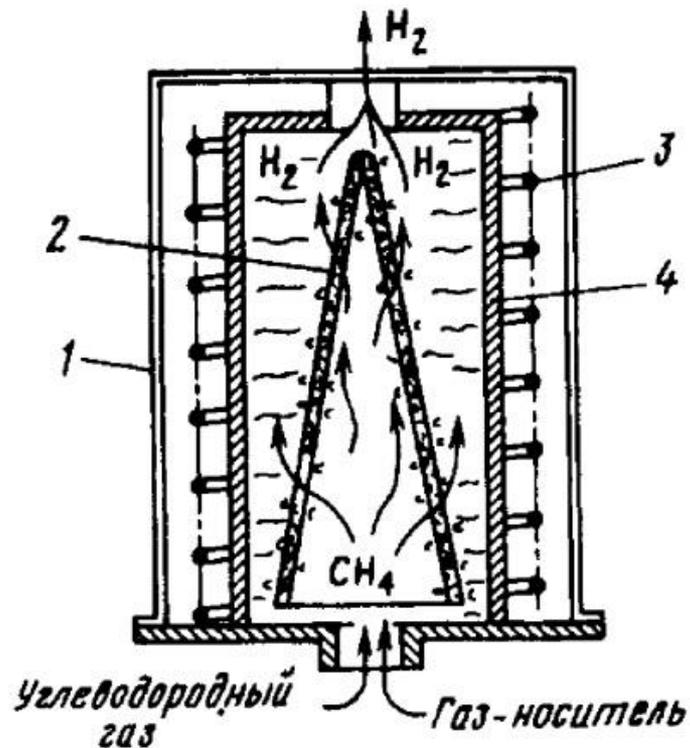


Рис. 1.40. Схема камеры для изотермического процесса химического осаждения:

- 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 ³	σ_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

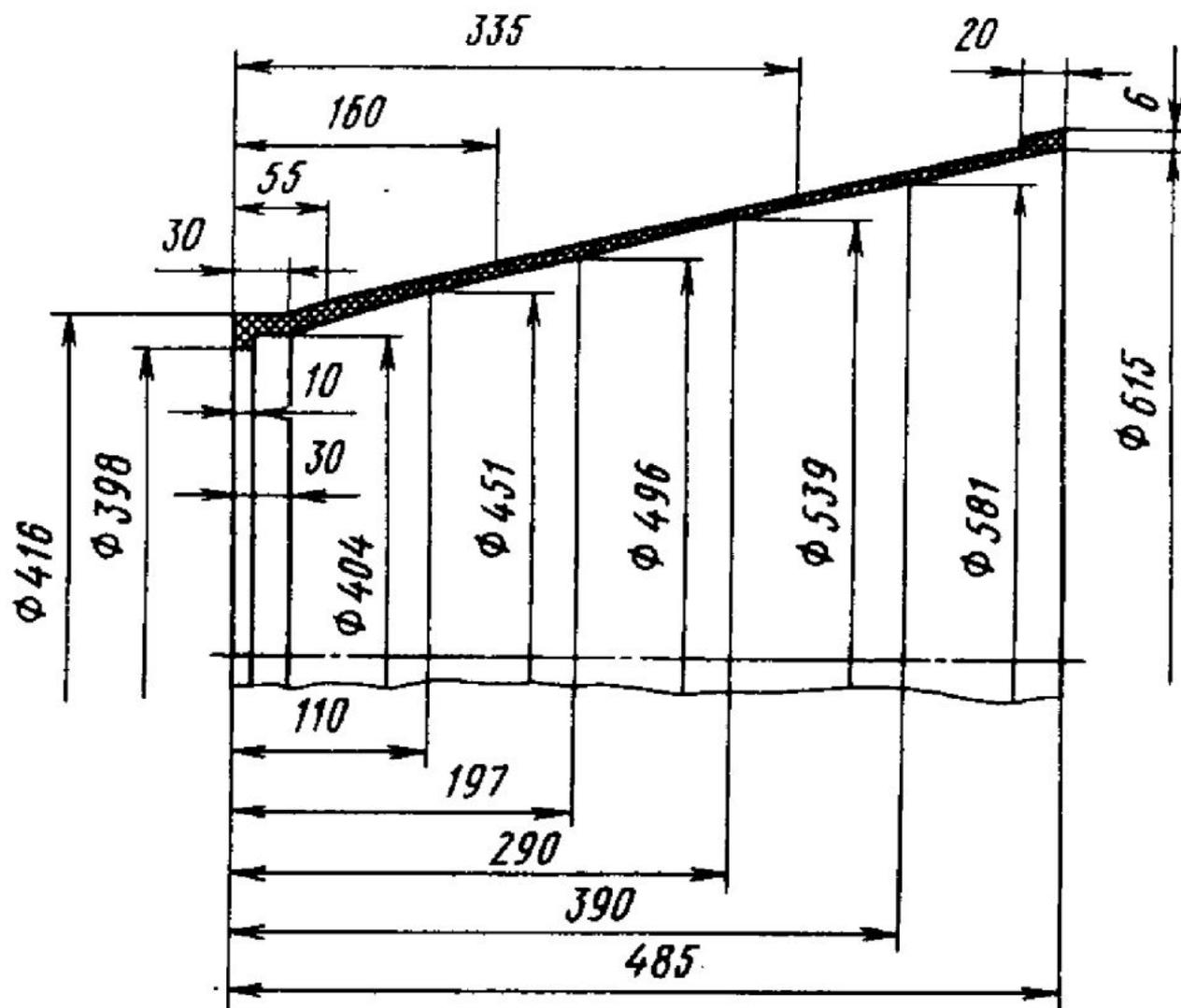
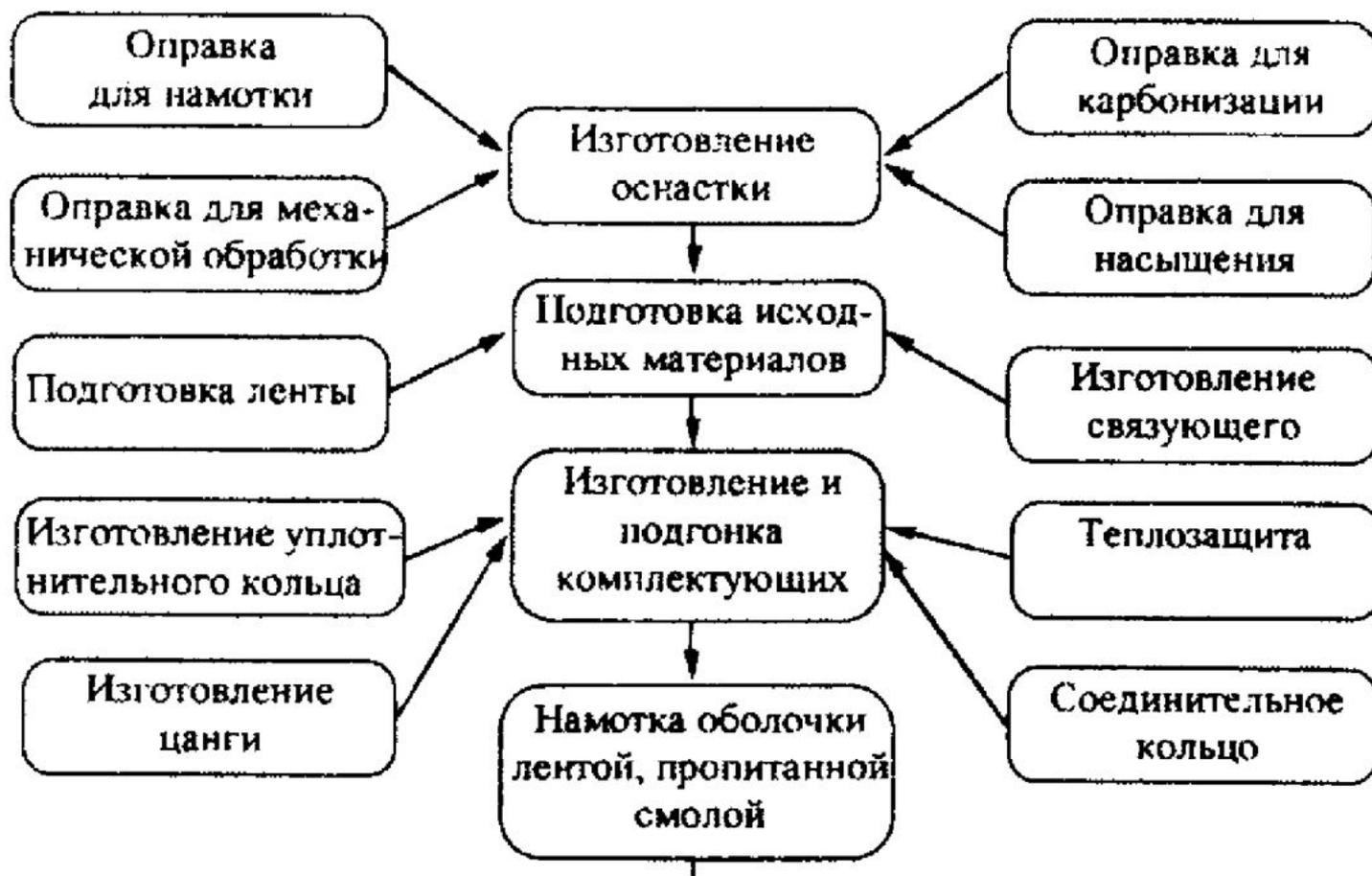


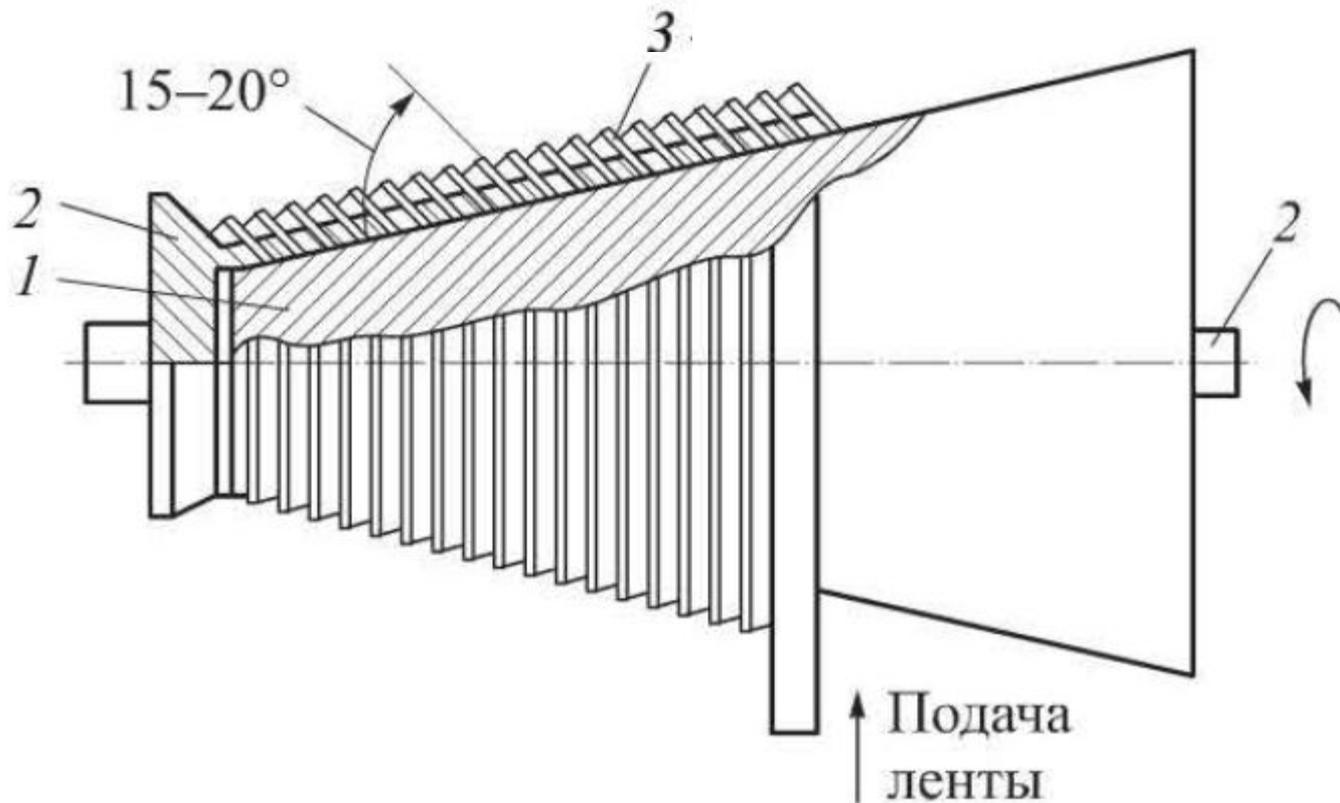
Рис. 6.17. Конструктивная схема насадки

Структурная схема технологического процесса изготовления насадка

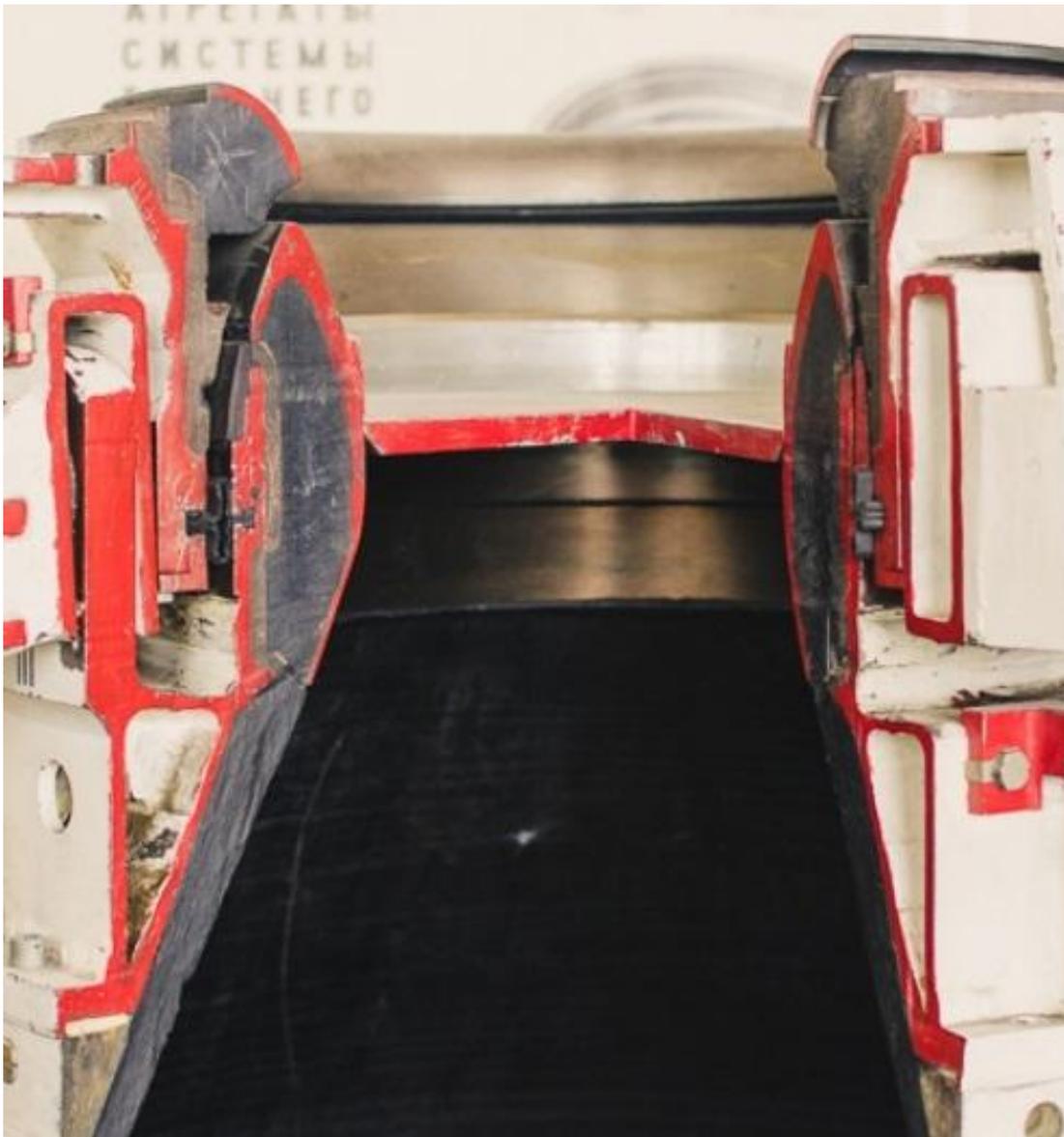




Схемы «кровельной» намотки абляционного теплозащитного покрытия на технологическую оправку



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



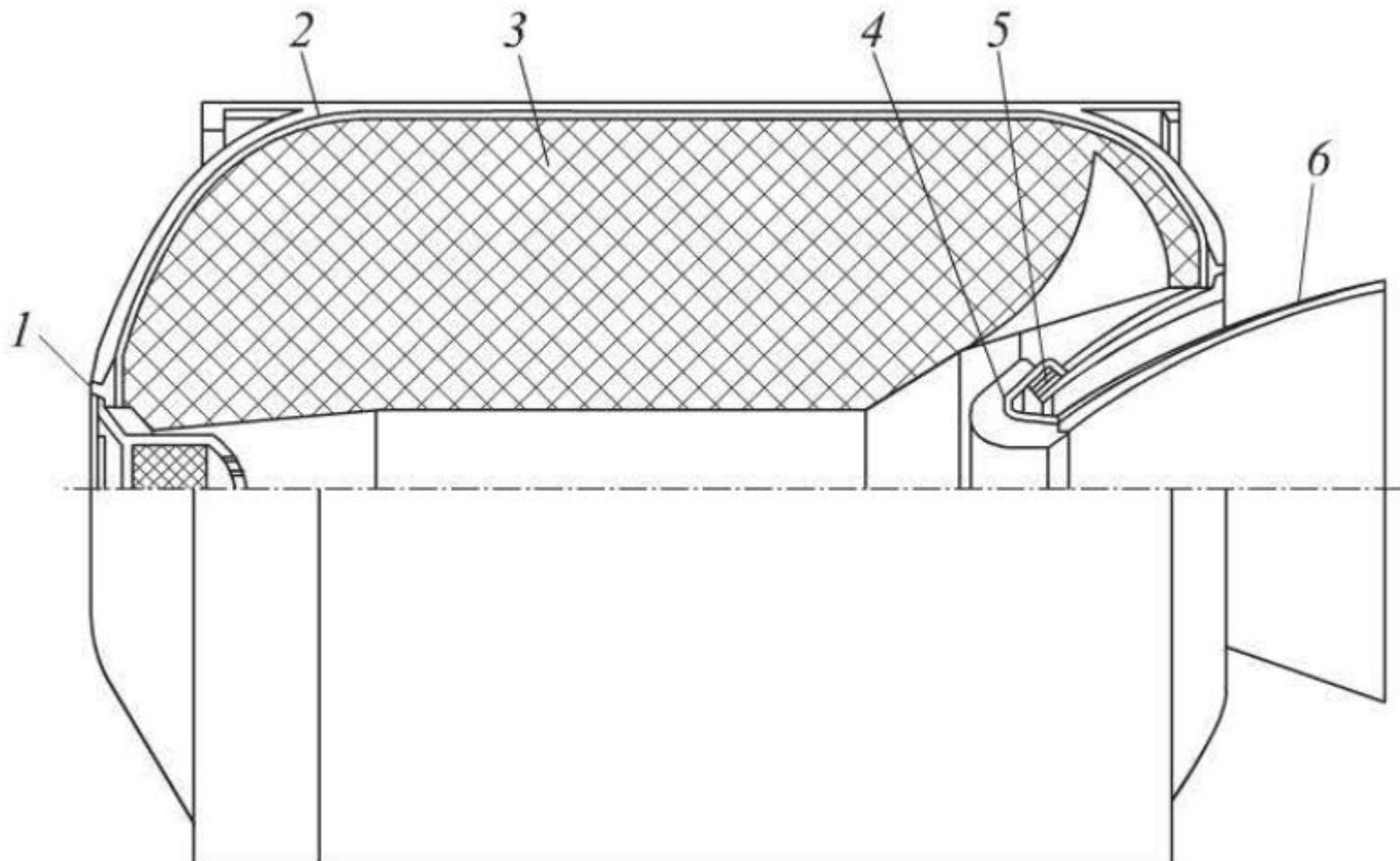


Рис. 1.2. Конструктивная схема маршевого РДТТ:

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

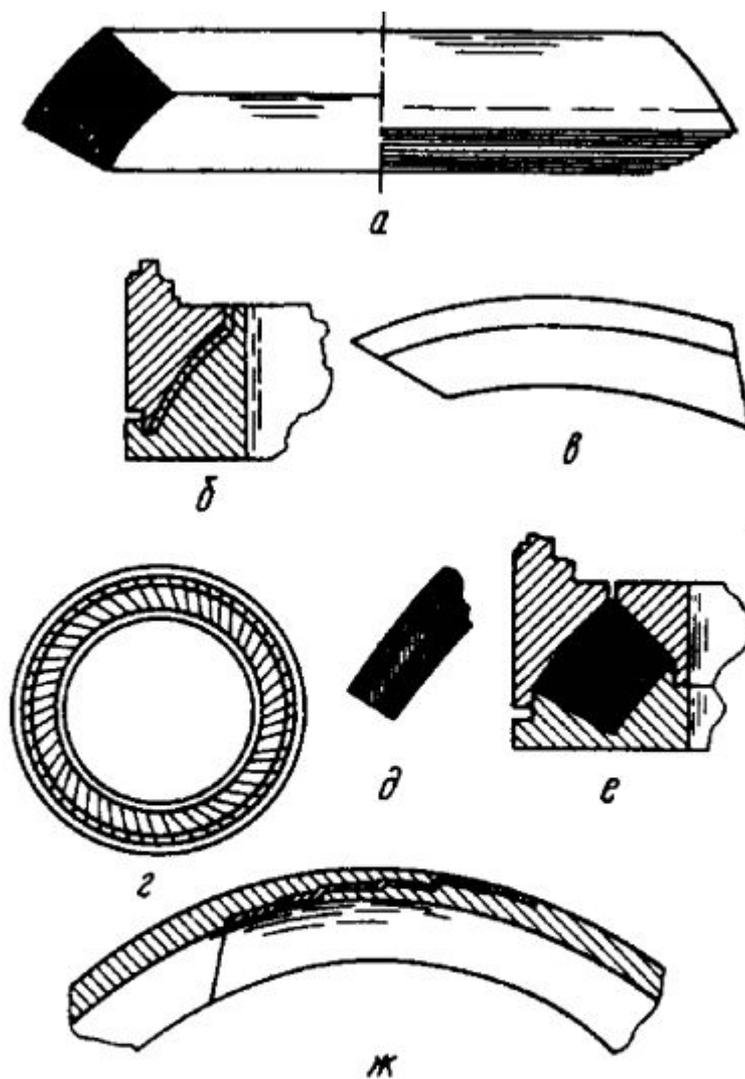


Рис. 6.20. Многослойный эластичный сферический шарнир:
a — типовая конструкция; *б* — процесс изготовления тарели; *в* —
 сегмент; *г* — пакет сегментов; *д* — схема сборки тарели в пакет;
е — опрессовка; *ж* — схема расположения слоев ткани в стенке
 тарели

Применение ПКМ в РДТТ

