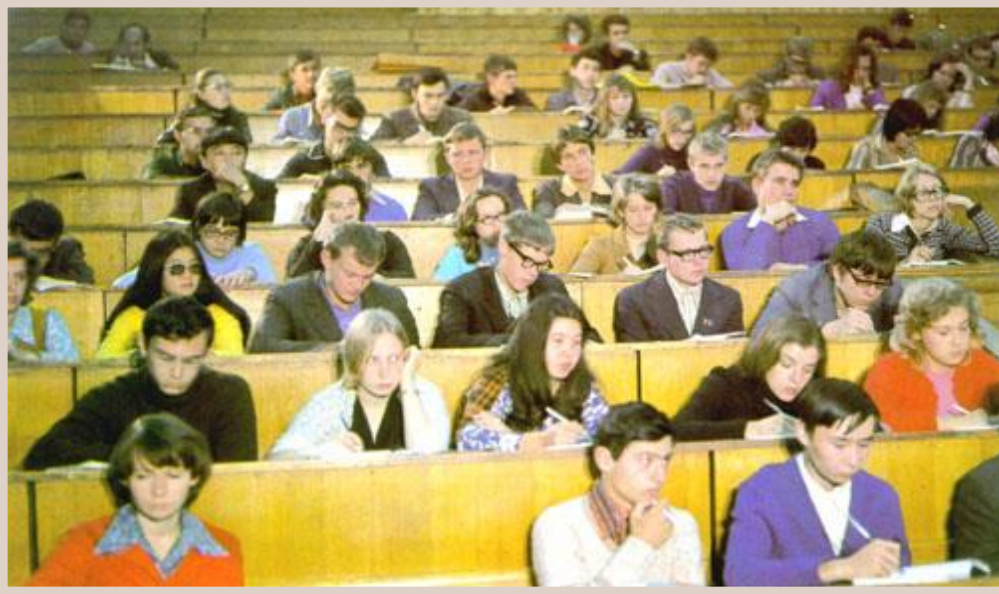
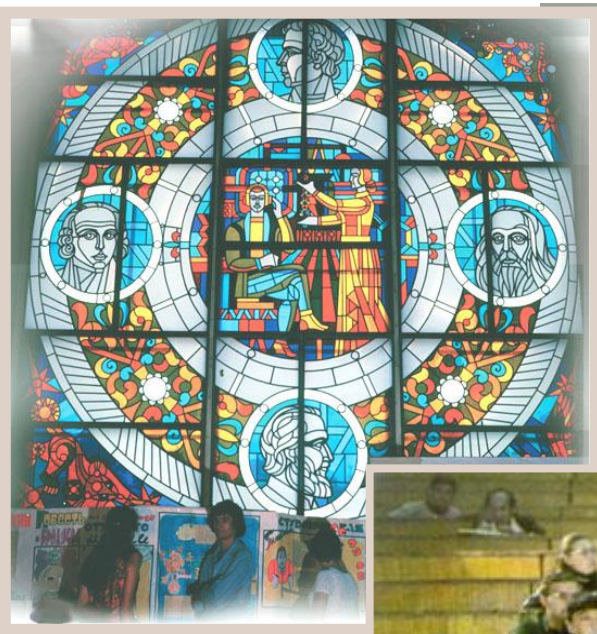




Введение в технику физического эксперимента

Лектор – проф. Пальчиков Евгений Иванович

ВТФЭ-2016

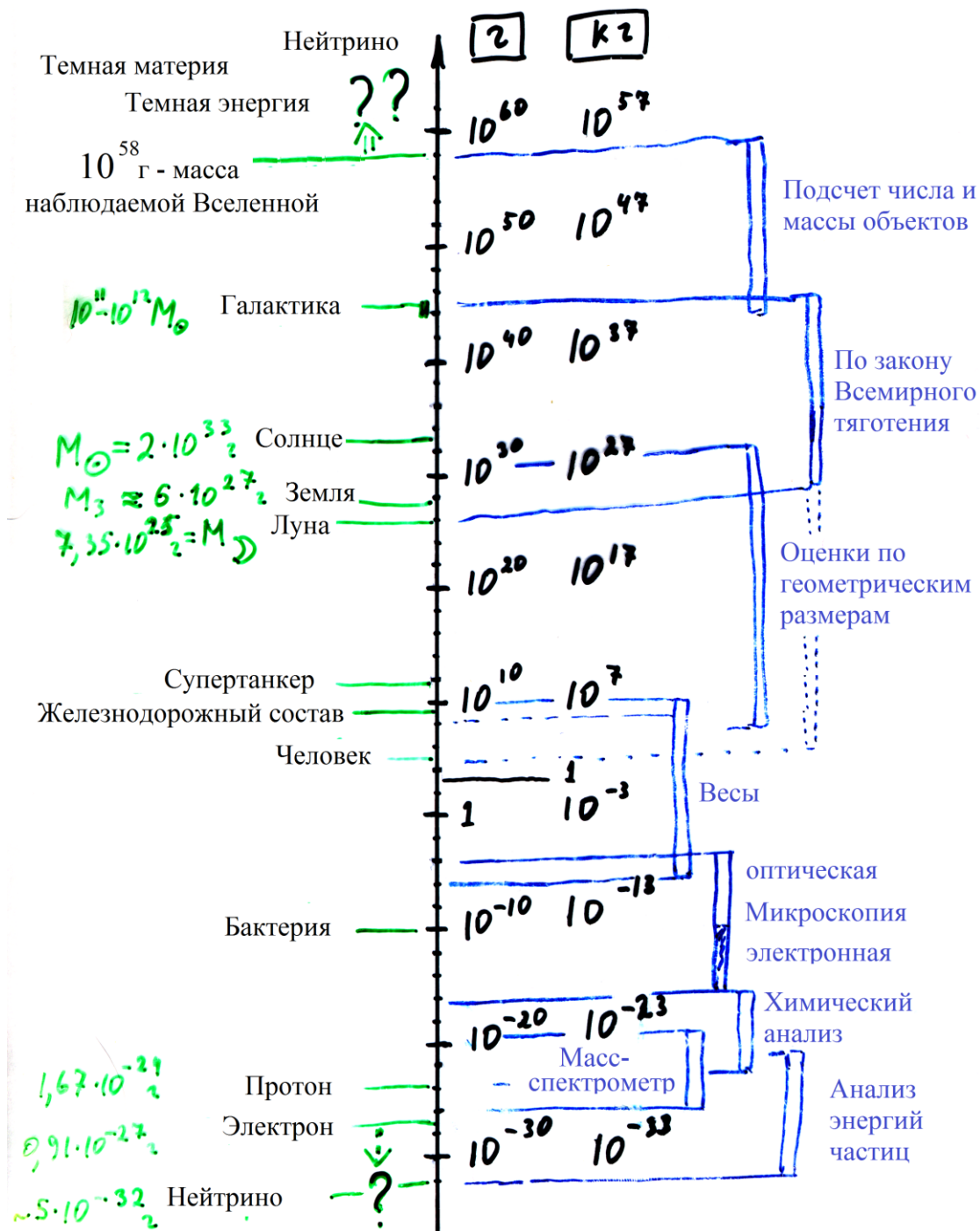
Методы и приборы для получения НИЗКИХ И ВЫСОКИХ давлений

Методы и приборы для измерения НИЗКИХ И ВЫСОКИХ давлений

Пальчиков Евгений Иванович
д.т.н., проф. НГУ, в.н.с. ИГиЛ

*Новосибирский Государственный университет
Сибирское Отделение Российской академии Наук*

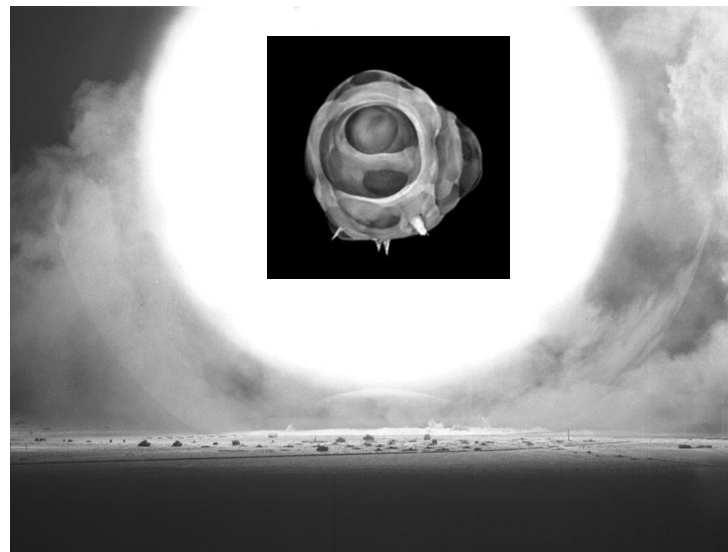
Шкала масс



Получение низких и высоких давлений

Высокие давления

- Исследование свойств вещества
- Моделирование статического состояния вещества в различных природных объектах
- Моделирование динамических процессов в природе
- Создание технологических условий для промышленных процессов и научных исследований



Низкие давления

- Эвакуация вещества при постановке эксперимента
- Моделирование состояния вещества в различных природных объектах
- Моделирование динамических процессов в природе
- Создание электровакуумных приборов
- Создание технологических условий для промышленных процессов и научных исследований



Единицы измерения давлений

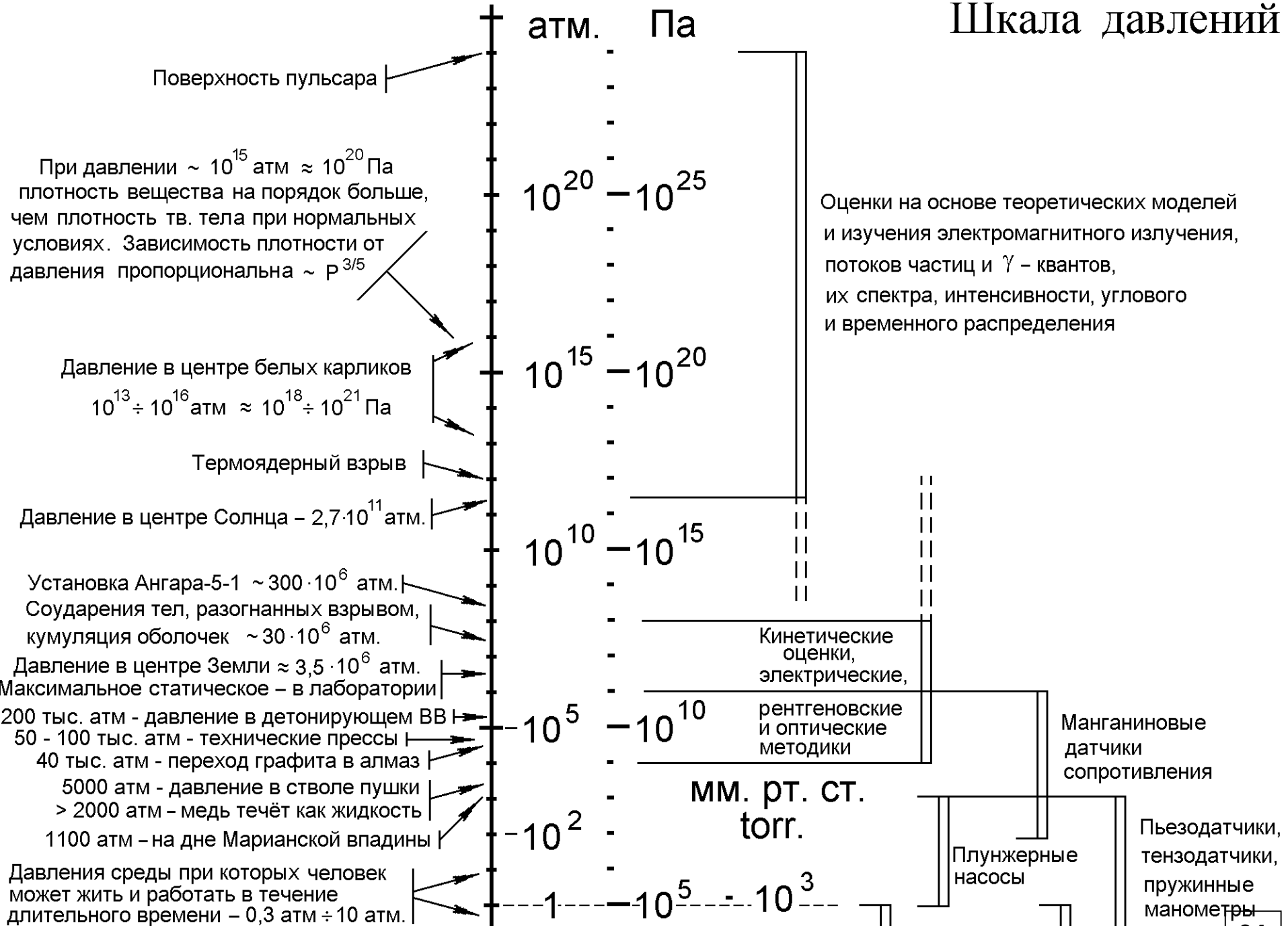
- $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10 \text{ дин/см}^2 = 0,102 \text{ кгс/м}^2 = 10^{-5} \text{ бар} = 9,87 \cdot 10^{-6} \text{ атм} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ ат} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм.рт.ст (torr)} = 0,102 \text{ мм.вод.ст.}$
- $1 \text{ атм (физическая) (atm)} = 101325 \text{ Па} = 1,0332 \text{ ат} = 760 \text{ мм.рт.ст} = 10332 \text{ мм.вод.ст.}$ — давление воздуха на уровне моря
- $1 \text{ ат (техническая) (at)} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98066,5 \text{ Па} = 0,980665 \text{ бар}$
- $1 \text{ бар} = 1 \text{ Б} = 10^5 \text{ Па} = 10^6 \text{ дин/см}^2 = 0,986923 \text{ атм} = 750 \text{ мм.рт.ст (torr)}$

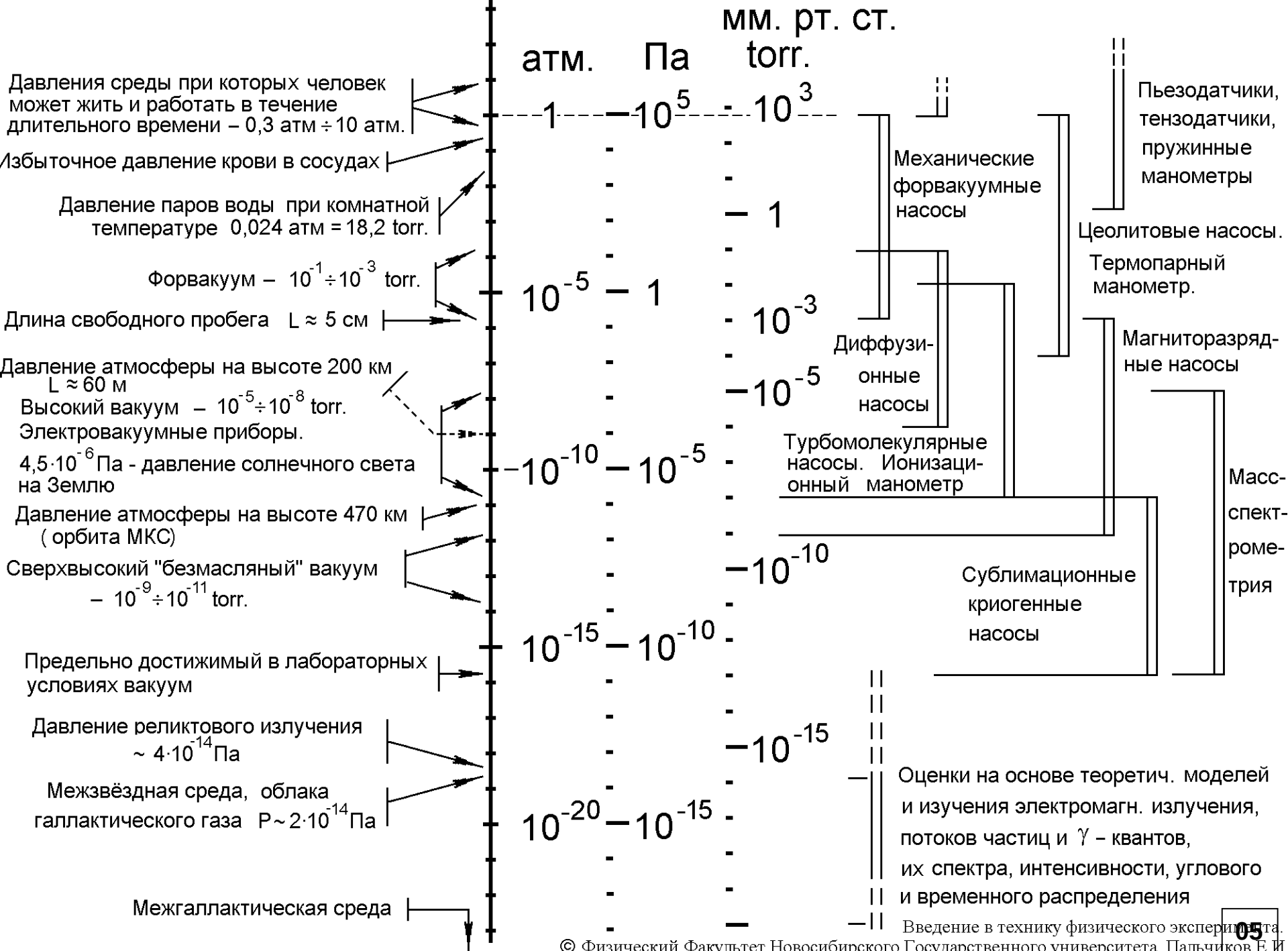
Считается, что $1 \text{ ат} \approx 1 \text{ атм} \approx 1 \text{ бар}$, но реально они все различны

Единицы давления

	Паскаль (Pa, Па)	Бар (bar, бар)	Техническая атмосфера (at, ат)	Физическая атмосфера (atm, атм)	Миллиметр ртутного столба (мм рт.ст., mmHg, Torr, торр)	Метр водяного столба (м вод. ст., m H ₂ O)	Фунт-сила на кв. дюйм (psi)
1 Па	1 Н/м ²	10 ⁻⁵	10,197·10 ⁻⁶	9,8692·10 ⁻⁶	7,5006·10 ⁻³	1,0197·10 ⁻⁴	145,04·10 ⁻⁶
1 бар	10 ⁵	1·10 ⁶ дин/см²	1,0197	0,98692	750,06	10,197	14,504
1 ат	98066,5	0,980665	1 кгс/см²	0,96784	735,56	10	14,223
1 атм	101325	1,01325	1,033	1 атм	760	10,33	14,696
1 мм рт.ст.	133,322	1,3332·10 ⁻³	1,3595·10 ⁻³	1,3158·10 ⁻³	1 мм рт.ст.	13,595·10 ⁻³	19,337·10 ⁻³
1 м вод. ст.	9806,65	9,80665·10 ⁻²	0,1	0,096784	73,556	1 м вод. ст.	1,4223
1 psi	6894,76	68,948·10 ⁻³	70,307·10 ⁻³	68,046·10 ⁻³	51,715	0,70307	1 lbf/in²

Шкала давлений





СГС

СИ

 $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Шкала плотностей

 10^{29} 10^{32}

Чёрная дыра

$$\left[\begin{array}{l} c = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \\ R = \frac{2GM}{c^2} \end{array} \right] \rightarrow \rho = \frac{M}{R^3} = \frac{2G}{M^2 c^2}$$

 10^{15} 10^{18} $3 \cdot 10^{17}$ Нейтронная звезда
(плотность нейтронов) $2,8 \cdot 10^{14}$ 10^{14} 10^{17} $2,8 \cdot 10^{17}$ Плотность атомного ядра
Плотность белых карликов (звезда) 10 10^4 $2,2 \cdot 10^4$ Осний $5 \cdot 10^3$ Земля 1 10^3

Вода

 $7 \cdot 10^2$ - Сатурн 10^{-1} 10^2 80 Жидкий водород $H_2 \rightarrow 80 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ 10^{-2} 10 1 - Воздух при 1 атм 10^{-3} 10^0 $0,1$ - Водород при 1 атм 10^{-4} 10^{-1} Реальные
предметы
(для
ориентир.)

$2/\text{cm}^3$

10^{-4} 10^{-1} $0,1 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$

10^{-9} 10^{-6} ← форвакуум

10^{-12} 10^{-9} — Диффузионн. насос

10^{-13} 10^{-10} } — Атмосфера вблизи космич. станции ($10^{-9} - 10^{-11}$)

10^{-14} 10^{-11} — МРauc. насос $10^{-11} - 10^{-12}$

10^{-16} 10^{-13} — Межпланетный газ ($10^{-11} - 10^{-13}$)

10^{-17} 10^{-14} — Сублимационный насос

10^{-17} 10^{-14} — Криогенный насос на Ti, He ($10^{-14} - 10^{-16}$)

10^{-17} 10^{-16} — Предельный лабор. вакуум

10^{-22} 10^{-19} — Облака космической пыли $2 \cdot 10^{-20} \text{ мкг/л}$

10^{-23} 10^{-20} — Средняя плотность Галактики

10^{-24} 10^{-21} — Критическая плотность Вселенной 10^{-26}

10^{-29} 10^{-26} — $3 \cdot 10^{-28}$ — Средняя плотность в-ва во Вселенн

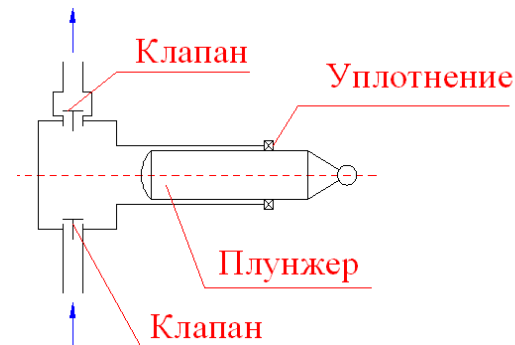
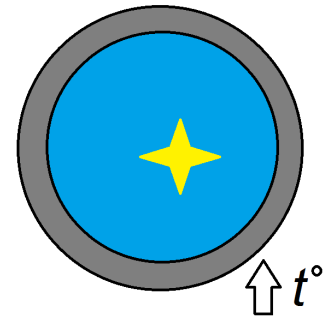
10^{-31} 10^{-28} — $3 \cdot 10^{-31}$ — Средняя плотность в-ва во Вселенной

$400 \div 500$ фотонов на 1 см^3 — Реликтовое излучение
 $5 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3 = \text{куб размером с Землю} \leftrightarrow 1 \text{ Дж}$
 + $300 \div 400$ реликтовых нейтрино на 1 см^3

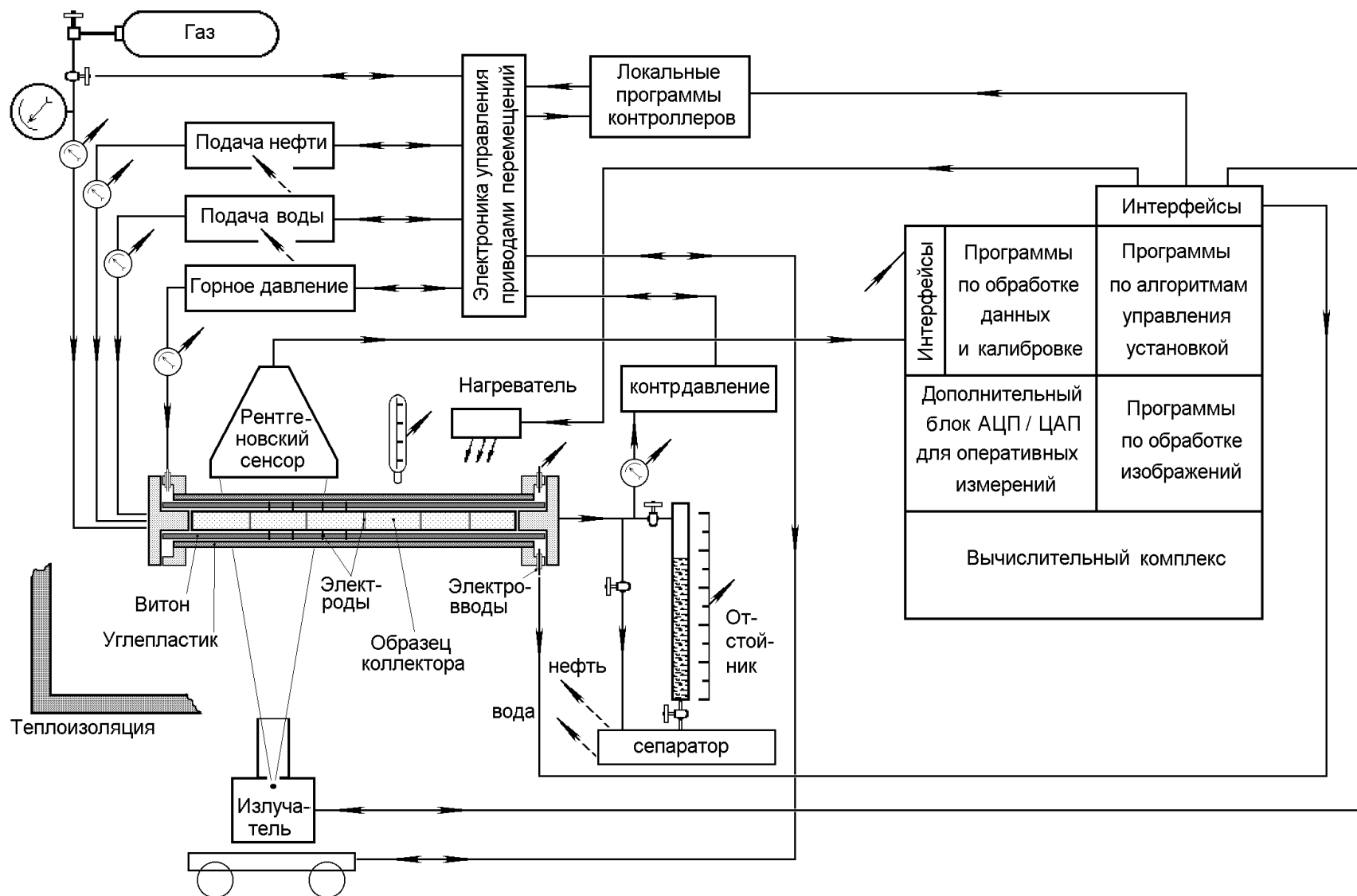
Атомов во Вселенной в 10^9 раз меньше, чем реликтовых фотонов

Методы создания высоких статических давлений

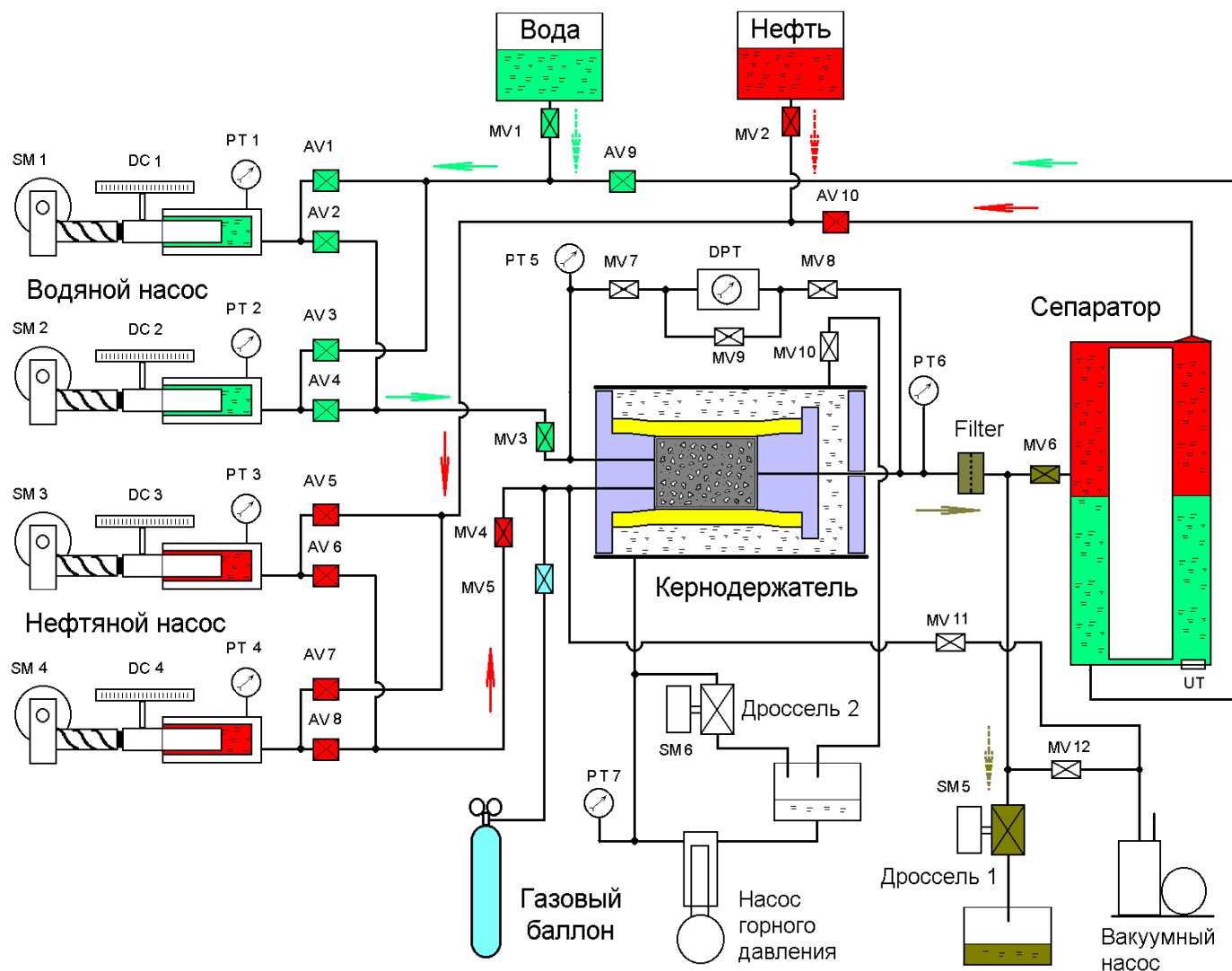
- Механические прессы.
 - Всестороннее обжатие.
 - Обжатие кольца между алмазными пуансонами.
- Герметичные нагреваемые бомбы
- Химические реакции в замкнутом объеме
- Гидравлические и газовые системы с плунжерными насосами



Исследование образцов нефтеносной породы в условиях пласта



Гидравлическая схема установки ПИК 2003/АЭИ для моделирования нефтяного пласта



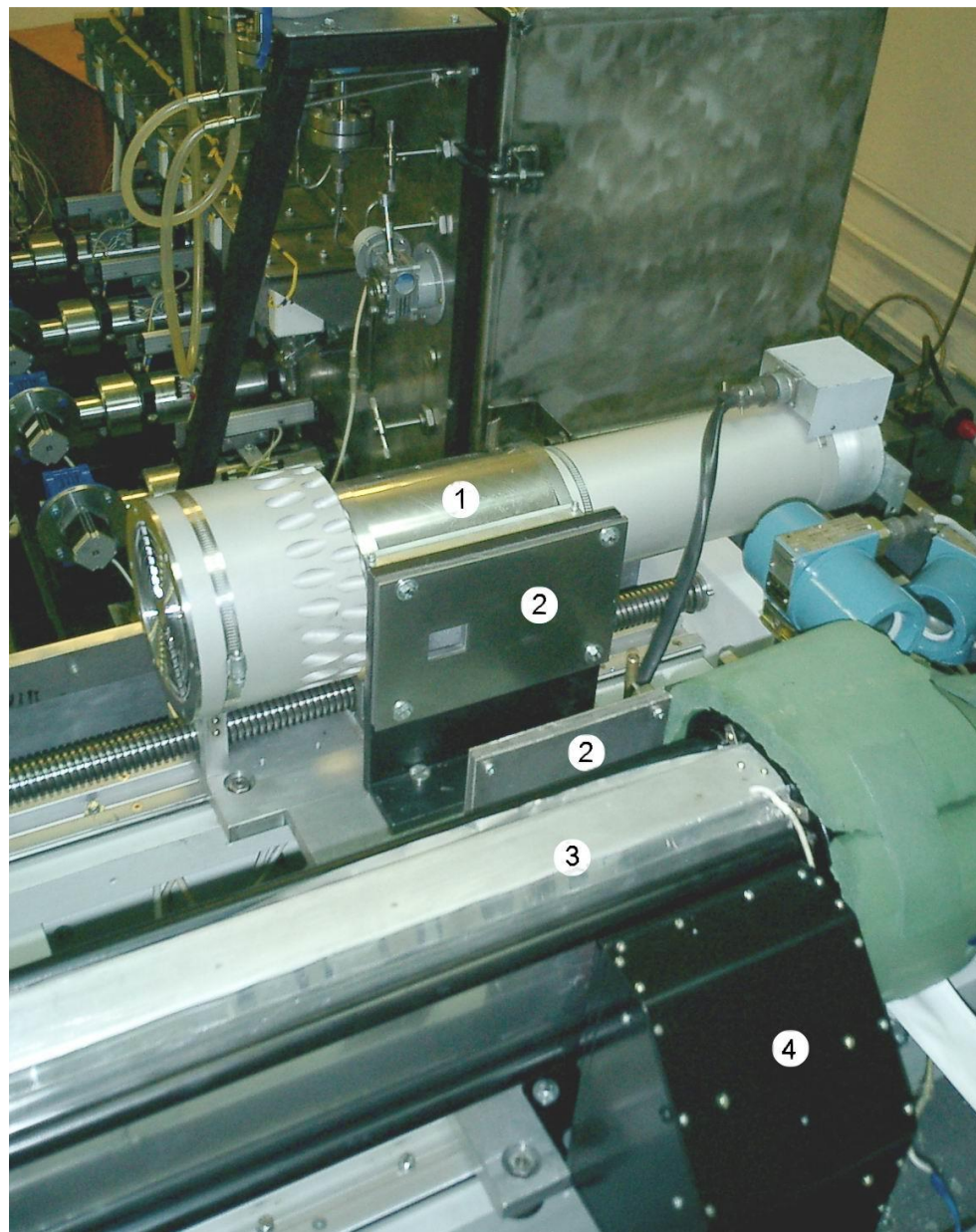
ПИК-2003/АЭИ, НОЦ Юкос - НГУ



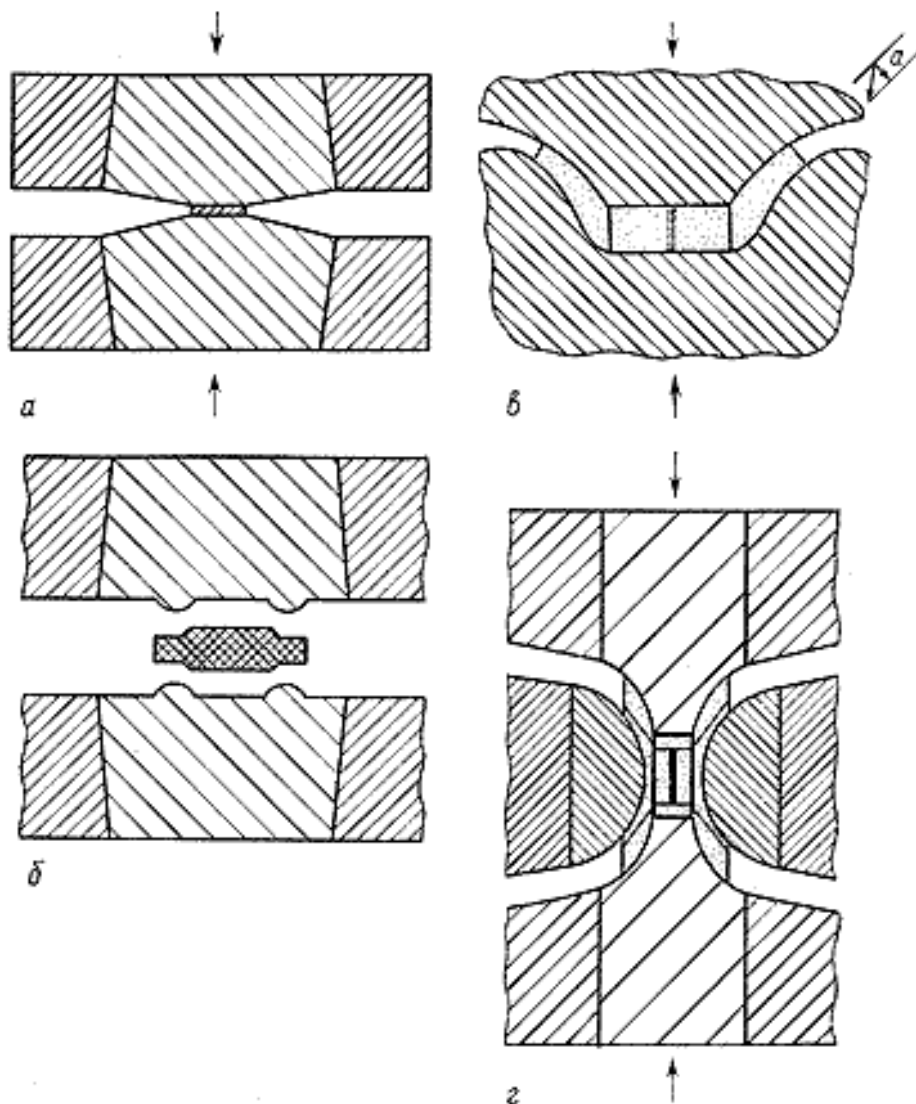
Конструкция системы сканирования

1 – рентгеновский источник
2 – коллиматоры
3 – кернадержатель в термоизоляции
4 – система регистрации изображений.

На заднем плане виден термошкаф для гидравлической системы с плунжерными насосами.

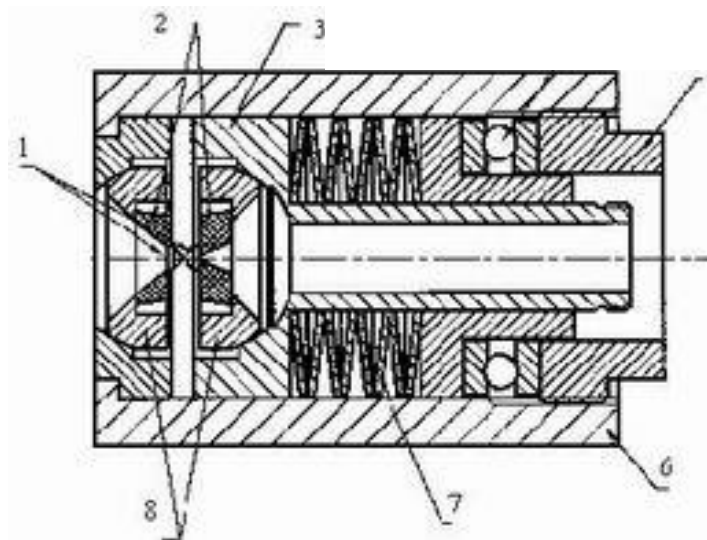
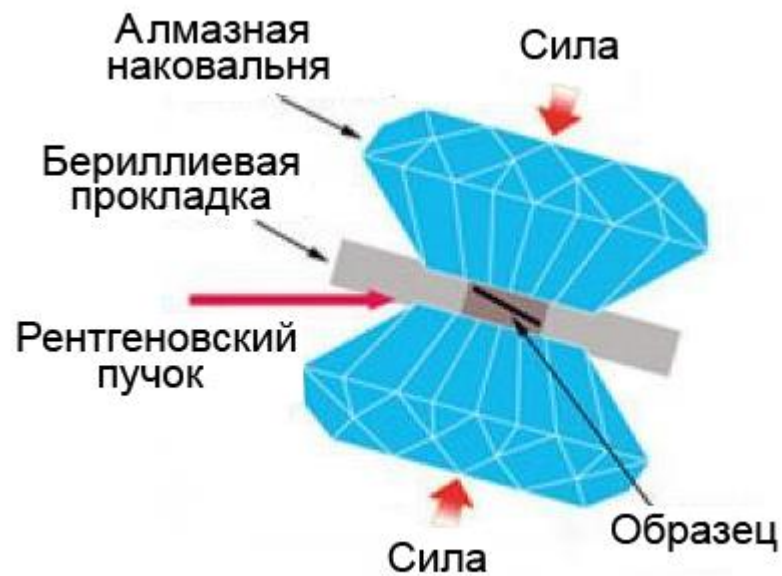


Развитие идей в конструировании твердофазной аппаратуры высоких статических давлений

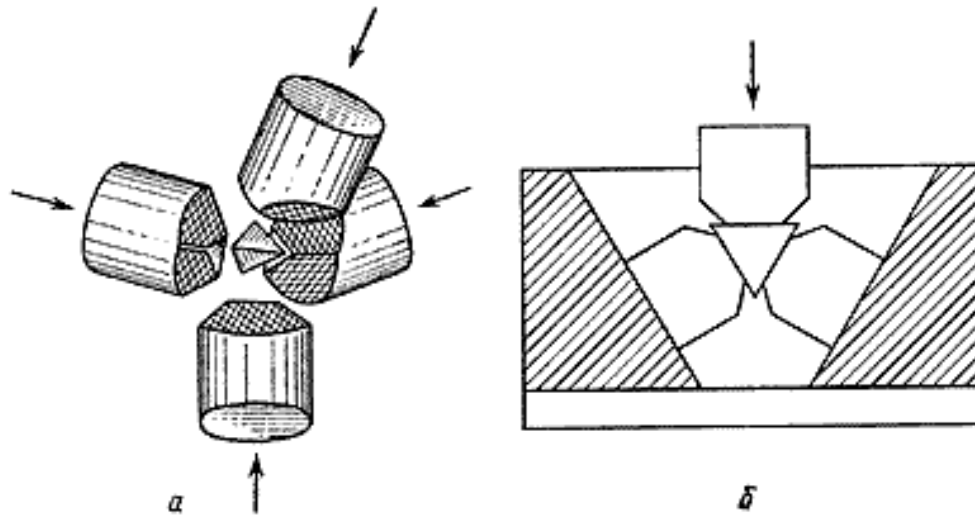


а - наковальни Бриджмена - давление создается за счет сближения поддерживаемых конических поршней;
б - камера типа "чечевица" (наковальни с лункой) - увеличение полезного объема камеры;
в - чашеобразная камера - увеличение хода поршня,
г - белт - аппарат. На белт-аппарате был впервые синтезирован алмаз

Алмазные наковальни



Многопуансонные аппараты



а - тетраэдрическая камера; б - тетраэдрическая камера, модификация, требующая применения одного гидравлического пресса

Многопуансонные аппараты позволяют достичь давлений 100 кбар. Одновременно увеличивается объем рабочей камеры (до 0.4 л), давление становится более гидростатичным, т.е. снижаются градиенты давления.

Многопуансонная кубическая камера



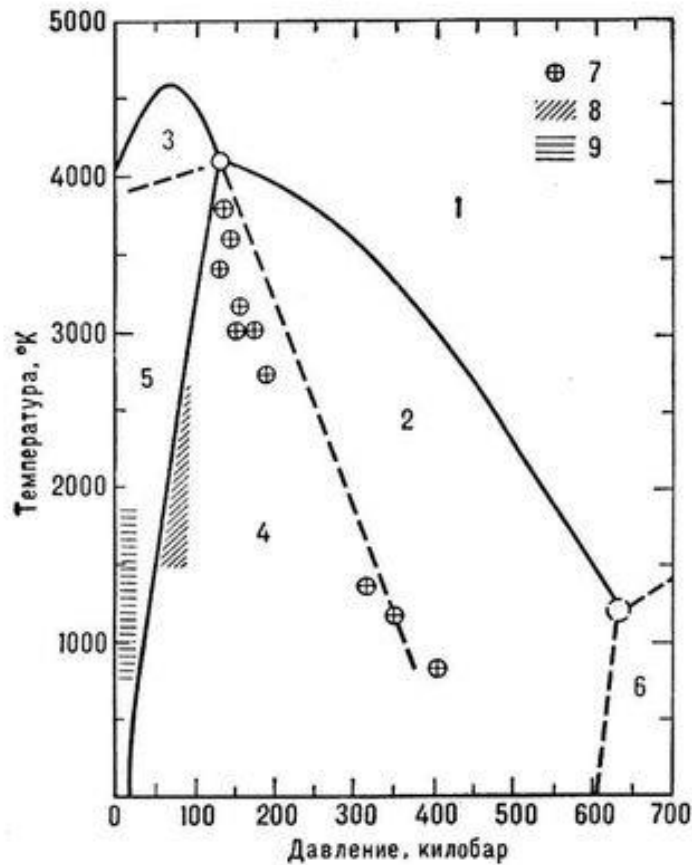
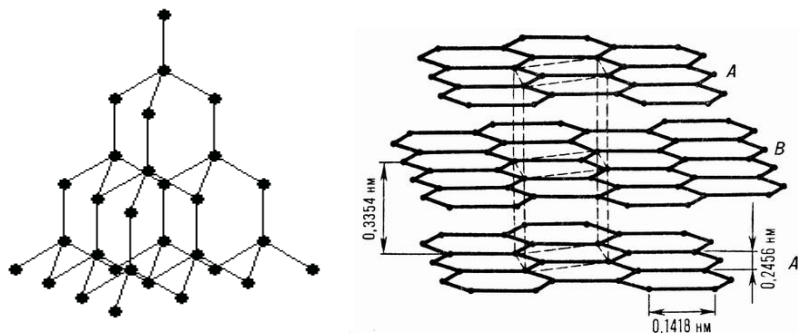
- Медь течет при давлении > 2000 Бар
- В щелях между пуансонами вытекающая медь зажимается и тормозится за счет сил трения
- Устанавливается радиальное распределение давления между пуансонами – от центра камеры наружу

Многокаскадные установки (принцип "матрешки")

Рекордное давление 2 Мбар было получено на "разрезной сферической многокаскадной многопоршневой установке" в лаборатории университета г.Осака (Япония):

- Образец сжимается по граням октаэдра восемью поршнями, образующими вместе разрезной куб.
- Последний помещается в разрезную сферу, состоящую из шести поршней.
- Сфера помещается в масляный резервуар.
- Масло сжимается насосом.

Диаграмма состояний углерода

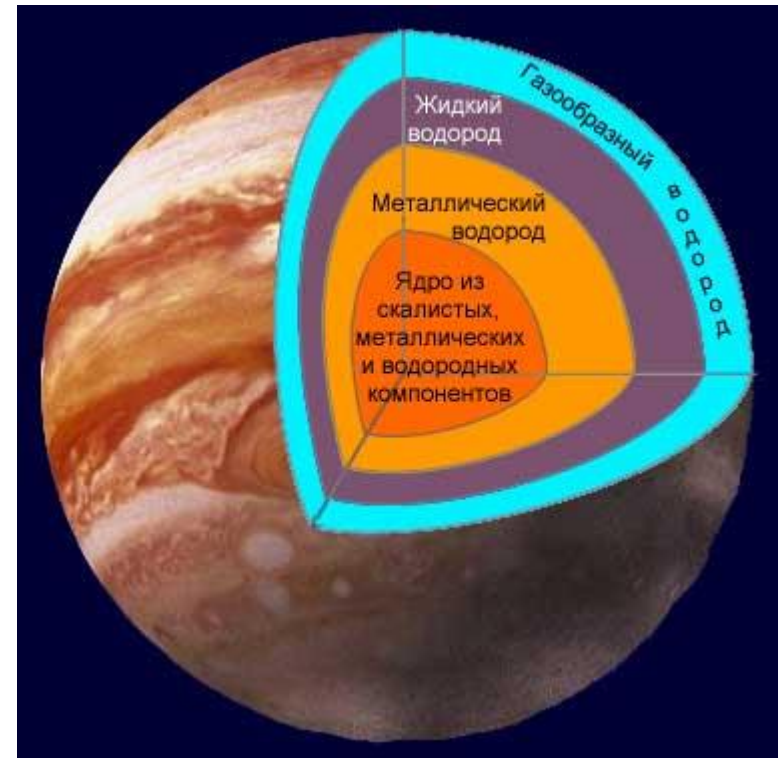
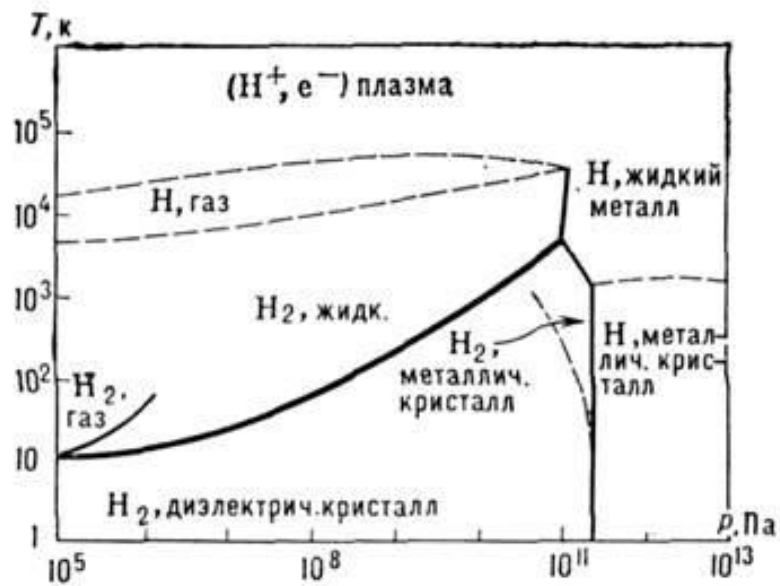


Области существования углерода в различных состояниях:

- 1 — жидкость;
- 2 — стабильный алмаз;
- 3 — стабильный графит;
- 4 — стабильный алмаз и метастабильный графит;
- 5 — стабильный графит и метастабильный алмаз;
- 6 — гипотетическая область существования иных твёрдых состояний углерода;
- 7 — точки, соответствующие условиям опытов по прямому превращению графита в алмаз;
- 8 — область образования алмаза с использованием металлов;
- 9 — область экспериментов по образованию алмазов при низком давлении

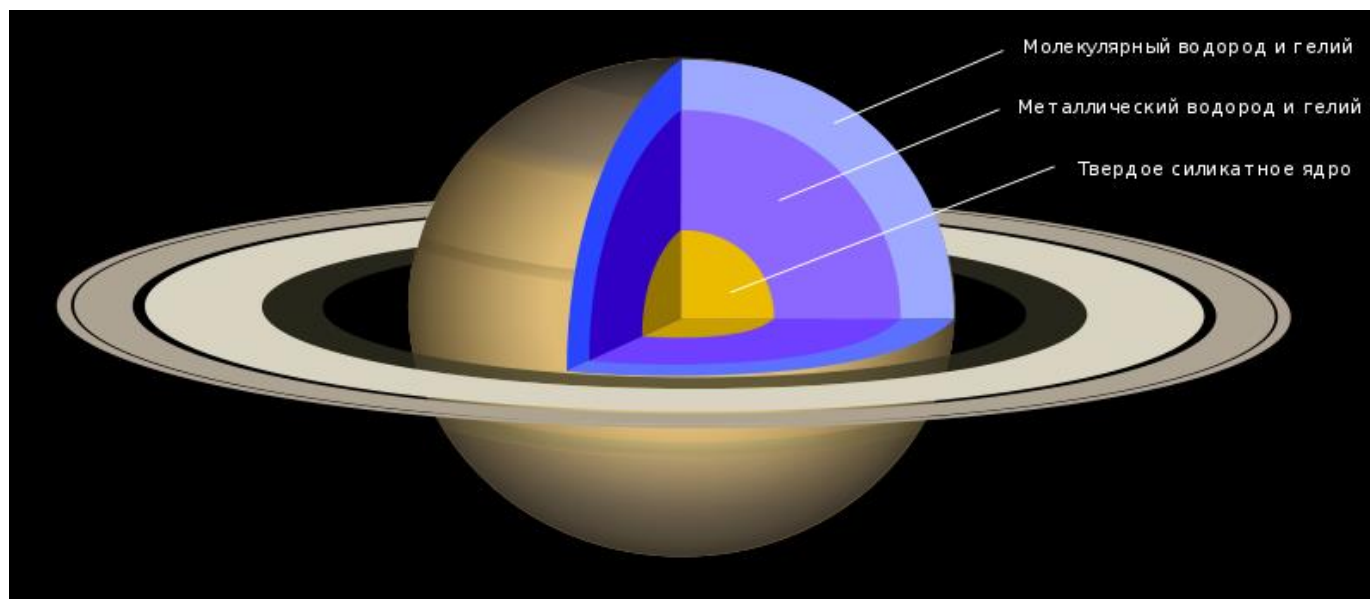


Диаграмма состояний водорода



Строение Юпитера

Диаграмма состояний водорода



В глубине атмосферы Сатурна растут давление и температура, и водород переходит в жидкое состояние, однако этот переход является постепенным. На глубине около 30 тыс. км водород становится металлическим (а давление достигает около 3 миллионов атмосфер). Циркуляция электротоков в металлическом водороде создаёт магнитное поле (гораздо менее мощное, чем у Юпитера).

В центре планеты находится массивное ядро из тяжёлых материалов — камня, железа и, предположительно, льда. Температура ядра достигает $11\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а энергия, которую оно излучает в космос, в 2,5 раза больше энергии, которую Сатурн получает от Солнца.

Взрывы

- Химический взрыв 5 МДж/кг – 200 000 атм.
- Кинетический взрыв. Метеориты, астероиды, быстр летящие объекты. 3 км/с – эквивалентно хим. взрыву (на единицу массы) – до $3 \cdot 10^7$ атм.
- Электромагнитный взрыв. Энергия запасённая в электрическом или магнитном поле локально выделяется на нагрузке. Взрыв мишени при лазерном или пучковом ТЯС – до $3 \cdot 10^8$ атм.
- Ядерный взрыв $\sim 10^{12} \div 10^{13}$ Дж/кг – до 10^{12} атм.
- Взрывы сверхновых звезд
- Большой взрыв (Big Bang)

В лабораторных
условиях
недоступны

Электромагнитные рельсовые ускорители твердых тел и взрывные магнитно-кумулятивные генераторы. ИГиЛ СО РАН



Токи – $0,5 \div 1$ миллионов ампер. Энергия электрического импульса – до $0,2 \div 1$ МДж. Скорости – до $7,4$ км/с

Профили композитных стволов разных калибров и
кратер в дюралюминии от попадания пластмассовой
пульки из ствола малого калибра (ствол справа внизу)



Давления при соударениях $\sim 10\,000\,000$ атм

55 лет с первых полетов человека в космос

Некоторые ранние работы, проведенные в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, связанные с полетами человека в космос

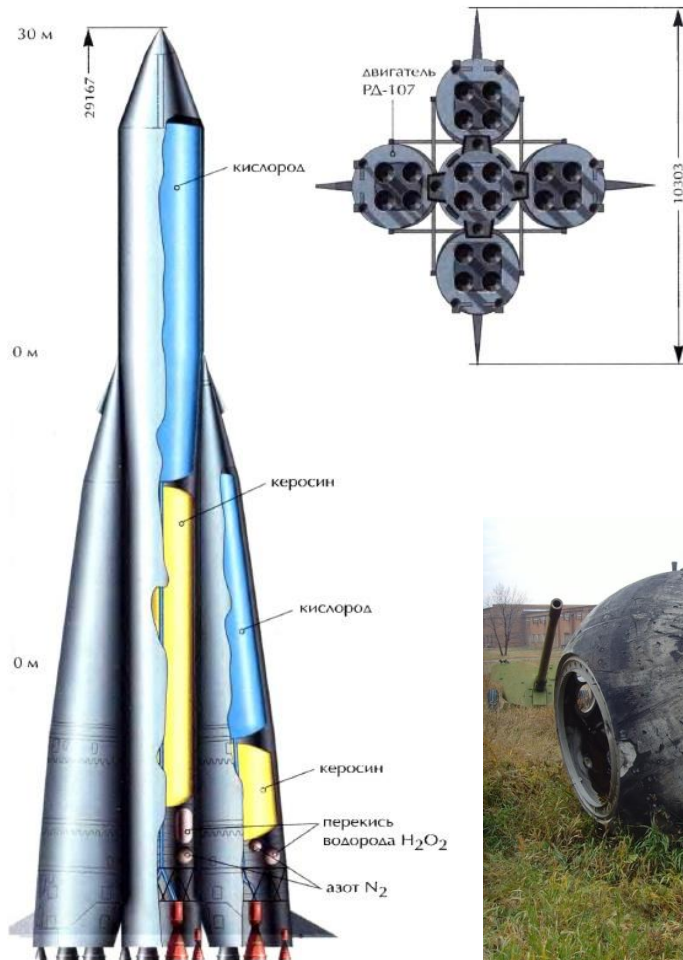
Подготовка к полету человека в космос была тесно связана с оборонными темами по созданию ядерного оружия и средства его доставки - межконтинентальных баллистических ракет

1961 год. Первые полеты.



1962 год. Групповой полет. Отработка систем связи и стыковки.
Свободное плавание внутри корабля. 1963 - первый полет женщины.

Головная часть ракеты-носителя Р-7



Ракета-носитель Р-7 – основа КК «Восток»



Спускаемая капсула КК «Восток»



Музей ядерного оружия в Федеральном ядерном центре. Первая Советский атомная межконтинентальная боеголовка – головная часть ракеты Р-7

Зачем было нужно создавать ракетно-ядерный щит?



- Это было необходимо для выживания людей и государства.
- США регулярно назначали даты бомбардировок Москвы, Киева, Ленинграда и Новосибирска.
- Делали заявления на уровне госдепартамента и в средствах массовой информации. Так же, как они делали заявления про Ирак и Югославию. Так как знали, что есть ядерная дубина и за океаном их никто не достанет.
- Если бы нас разбомбили, как Японию, Югославию или Ирак, цена потерь была бы намного выше

Атомная бомба – кумулятивное устройство



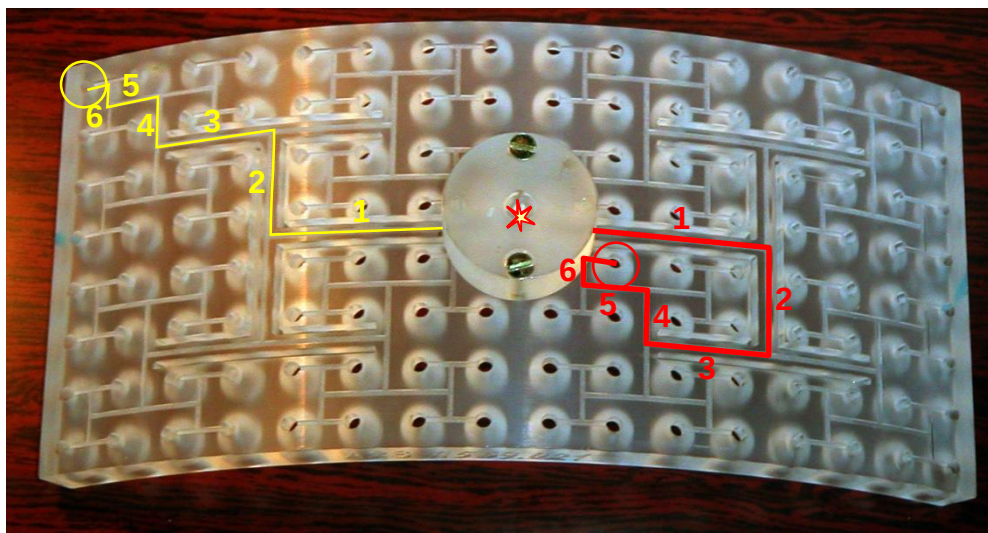
Необходимо было с помощью взрыва как можно быстрее собрать сферическую или овальную металлическую оболочку в сплошной шар. При этом оболочка ведет себя как жидкость

Музей ядерного оружия в Федеральном ядерном центре (г. Саров).

Первый Советский Артиллерийский атомный снаряд был сделан под руководством М.А. Лаврентьева



Система для синхронного подрыва кумулятивного цилиндрического заряда (схлопывание цилиндрической оболочки в стержень)



Каналы для распространения детонации имеют фрактальный вид.



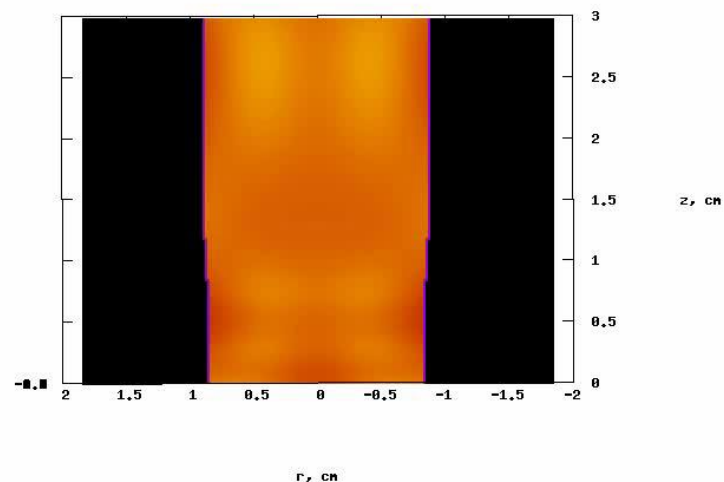
Расстояние от центральной точки подрыва до любого отверстия на поверхности — одинаково

Использование ускорителей частиц. Импульсная протонография. Импульсная рентгенография



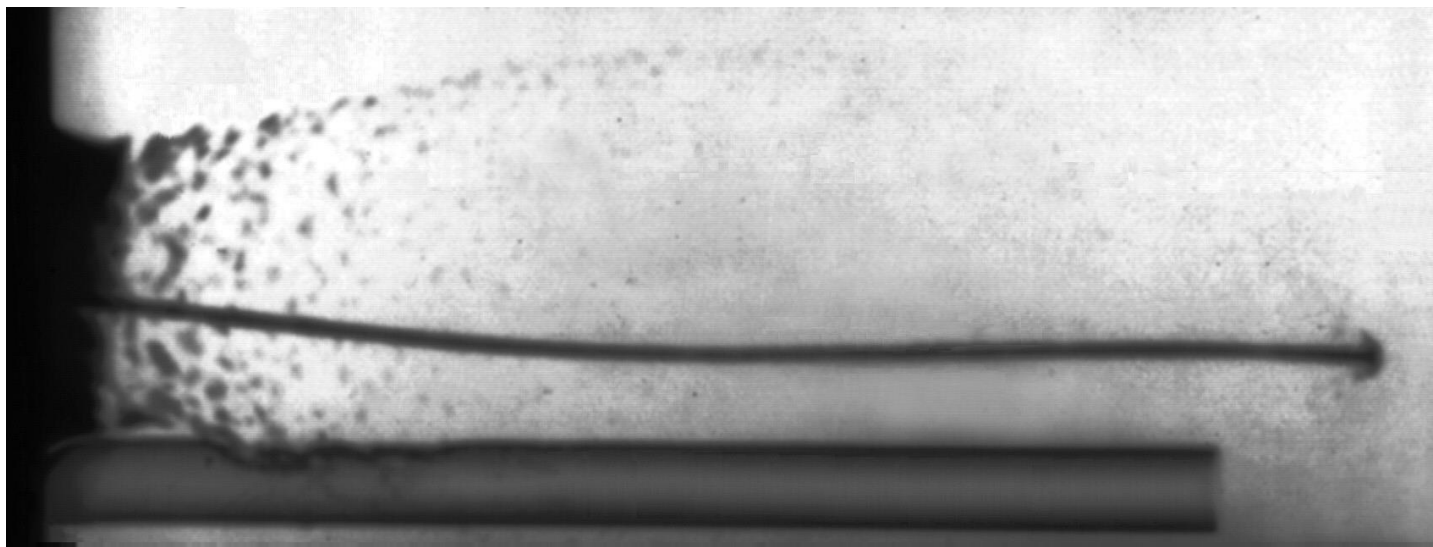
0,00 МКС

У-70. Серпухов.
ВНИИЭФ, Саров



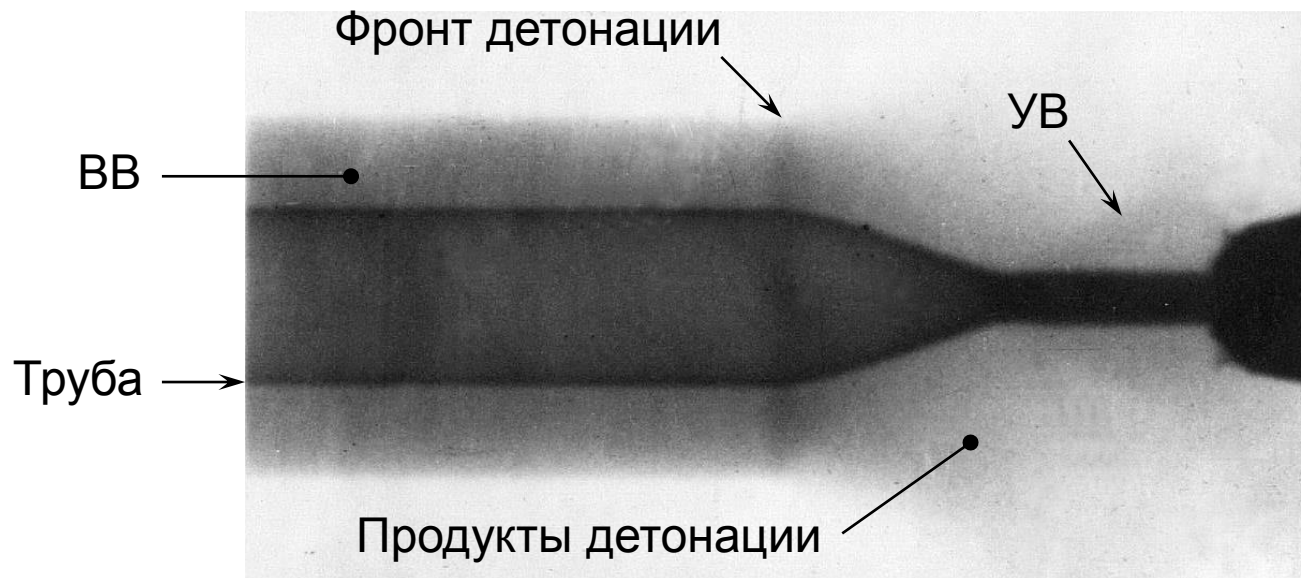
ВЭПП-3. Новосибирск.
ИГил, ИЯФ – СО РАН

Металлическая струя от кумулятивного заряда после преодоления стальной стенки



Снято с помощью аппарата ПИР-240 на пленке РМВ с двумя усиливающими экранами ЭУВ-2 (CaWO_4). Скорость головы струи – 6 километров в секунду.

Импульсная рентгенография. Снимок взрывного процесса с наблюдением ударных и детонационных волн

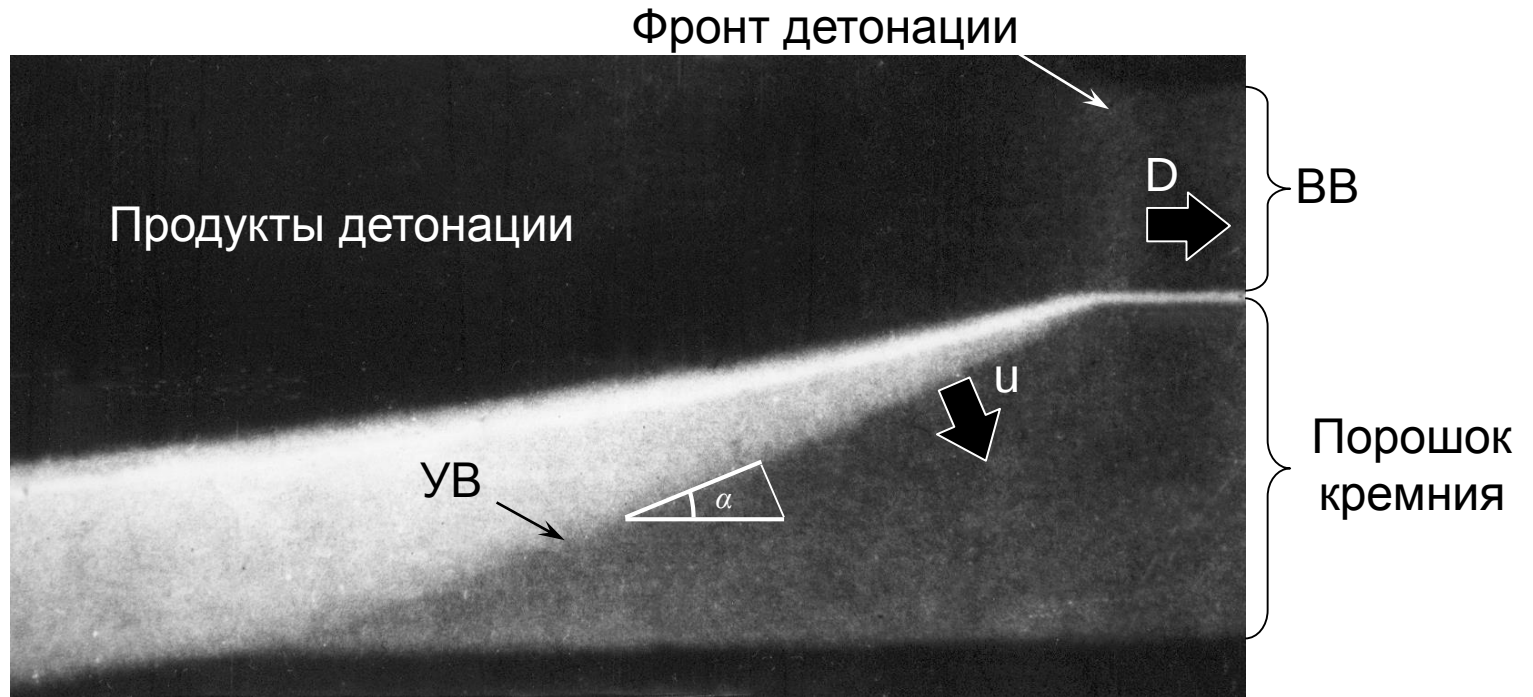


Снимок взрывного обжатия трубы до стержня, полученный аппаратом ПИР-600М на пленку РМ-1 с усиливающим экраном ЭУВ-2 (CaWO_4) при расстояниях фокус-пленка 1,2 м, объект – пленка 30 см.

В эксперименте металлической труба с диаметром 35 мм и толщиной стенки 0,8 мм обжимается цилиндрическим зарядом взрывчатого вещества с внешним диаметром 70 мм.

Видны: труба, ВВ, фронт детонации, разлет продуктов детонации, ударная волна в продуктах детонации, сплошной стержень получающийся при схлопывании трубы.

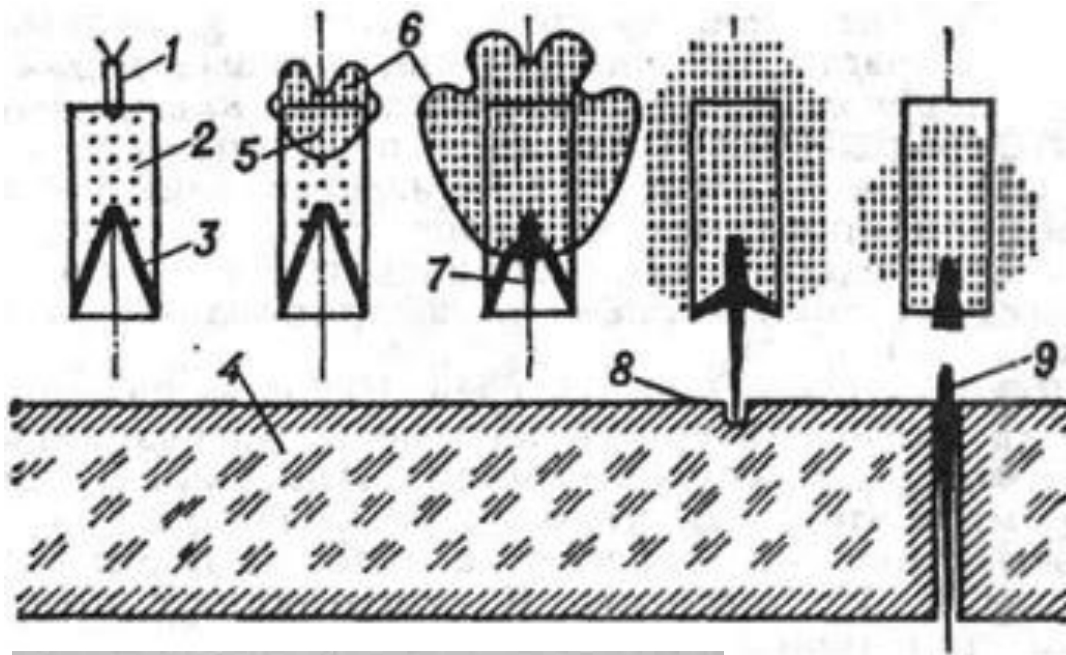
Ударные волны в пористых средах



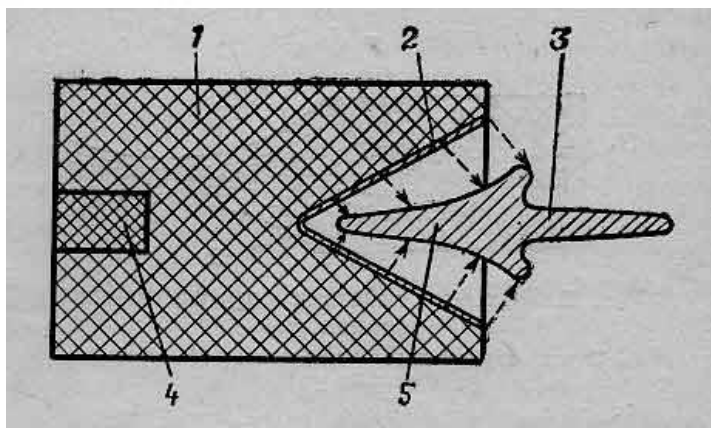
$\sin \alpha = u/D$, где D – скорость детонации, u – скорость ударной волны в порошке

С помощью геометрических данных, полученных при рентгеновской съемке из уравнения состояния можно оценить давление в исследуемом веществе

Действие кумулятивного снаряда

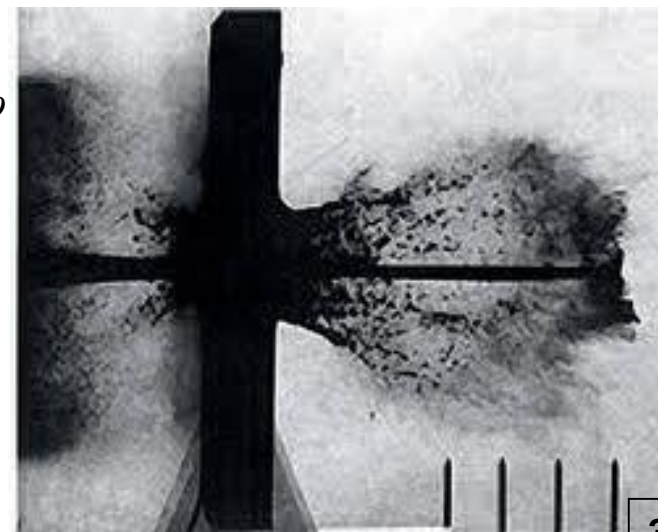


Металл течет как жидкость



$$\frac{\rho V^2}{2} \gg E_{\text{Деф}}$$

Применимы
уравнения
и модели
гидродинамики



Первым теоретическую модель действия кумулятивного заряда создал М.А. Лаврентьев

Кумулятивные струи.
М.А. Лаврентьев показывает на лекции в ЛФМШ
устройство кумулятивного заряда

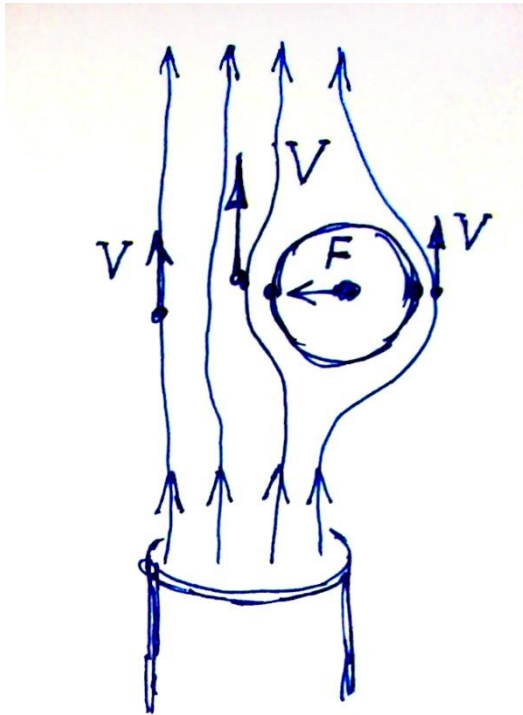


**Газовая кумулятивная струя использовалась для
разгона искусственного метеорита**

М.А. Лаврентьев показывает на лекции в ЛФМШ как шар держится в струе воздуха



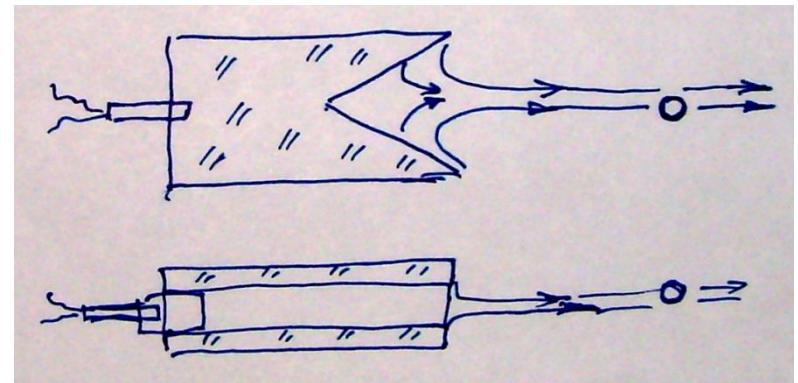
Шарик втягивается в газовую струю



Согласно уравнению Бернулли

$$\frac{\rho V^2}{2} + P + \rho gh = Const$$

в середине струи скорость V больше, а давление P меньше



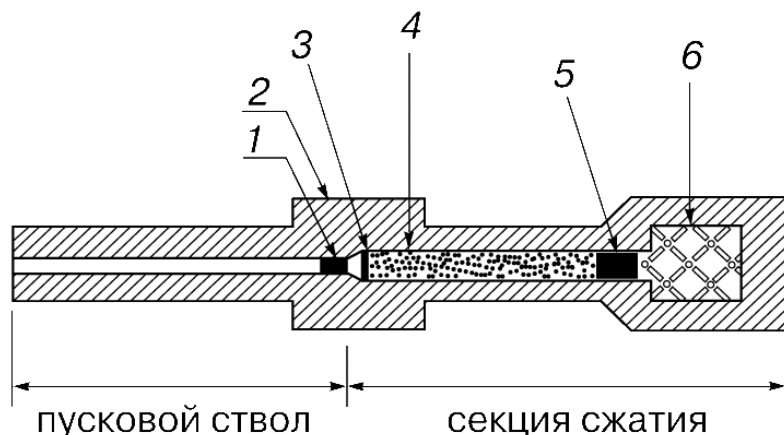
Это явление было использовано учеником М.А. Лаврентьева В.М. Титовым (ныне академиком РАН) для разгона стальных шариков газовой кумулятивной струей.

Скорость газовой кумулятивной струи может достигать 60 км/с.

Шарик можно разогнать до скоростей 7-12 км/с

Легкогазовая пушка. Высокоскоростной удар.

Гораздо сложнее по устройству, имеет большие размеры и разгоняет частицы до меньшей скорости, чем газовая кумулятивная струя

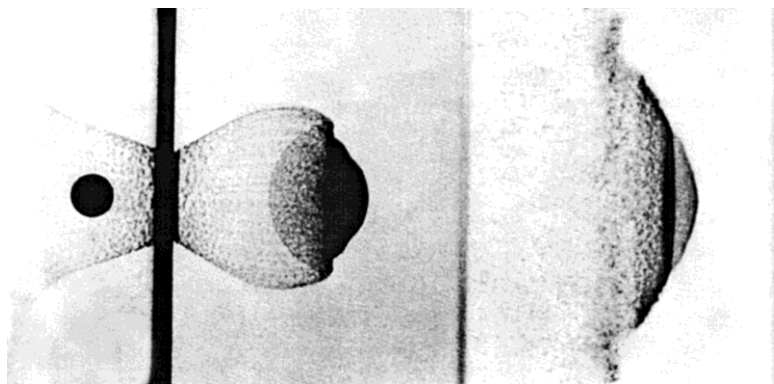
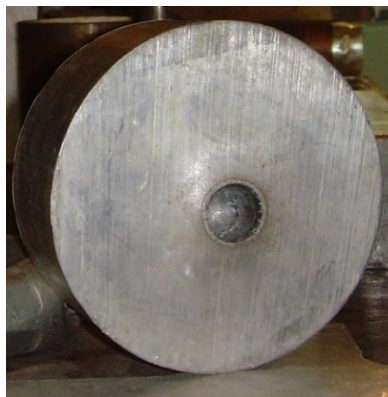
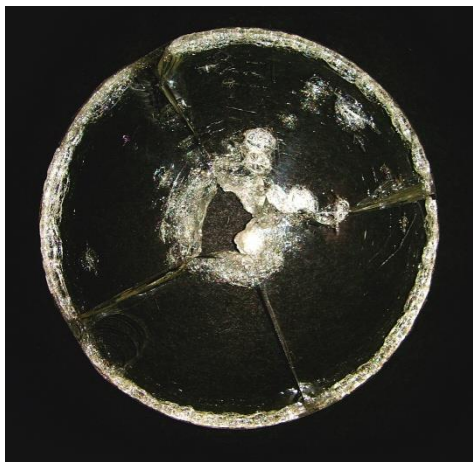


<http://tsniimash.ru/institute/aerogasdynamics/basic-setup-cta/>

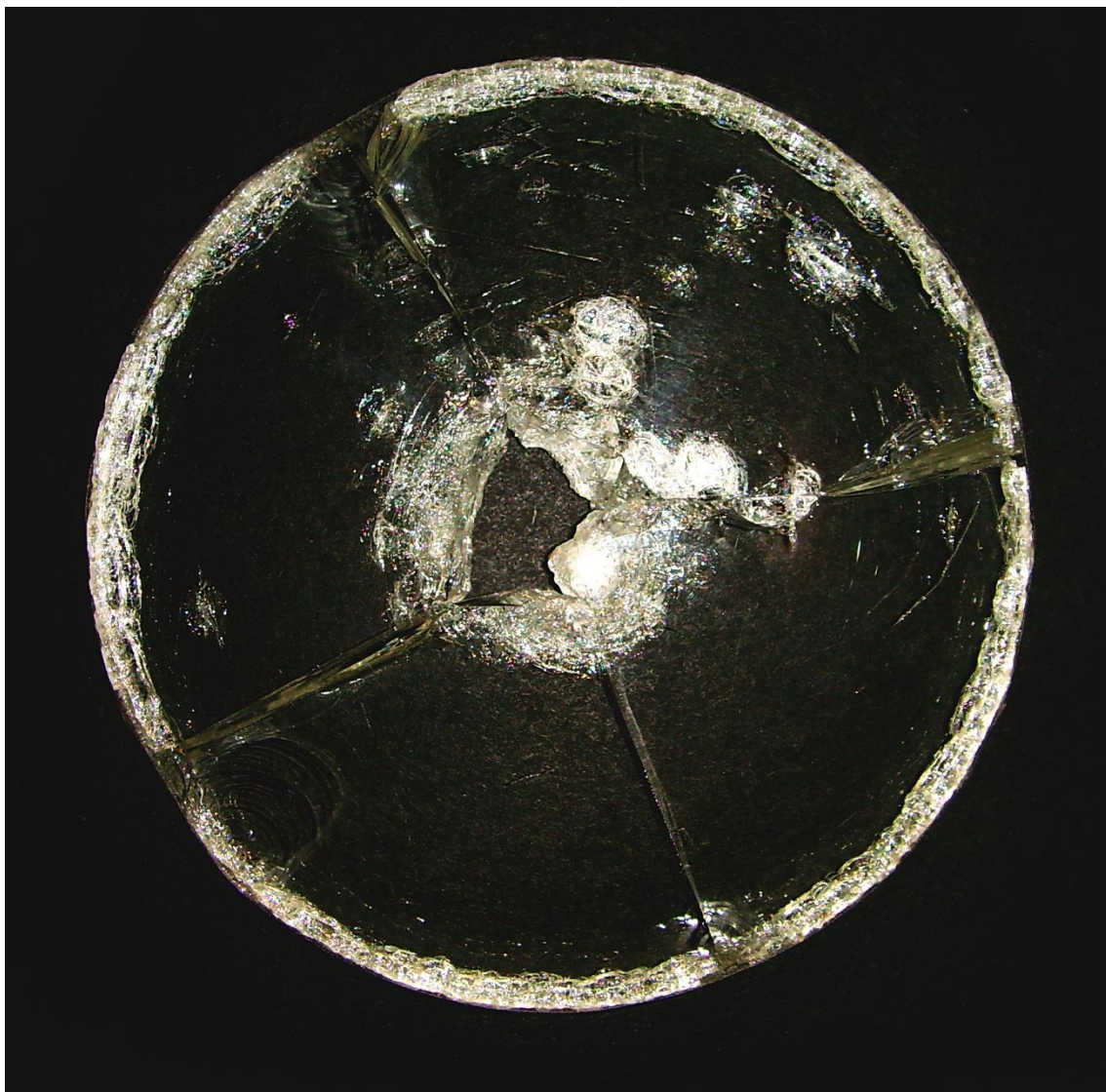
ГАЗОВАЯ ПУШКА, получившая свое название от легкого газа (водорода или гелия), используемого в ней. Пороховые газы сжимают легкий газ, пока он не разорвет диафрагму и не выбросит снаряд. Газовая пушка может сообщать снаряду скорости, более чем вдвое превышающие 2000 м/с, – предел для обычных орудий. 1 – снаряд; 2 – ограничительная секция; 3 – диафрагма; 4 – легкий газ под начальным давлением 3–9 МПа; 5 – поршень; 6 – пороховая камера.

Достоинства – разные формы снарядов, лучшая повторяемость экспериментов

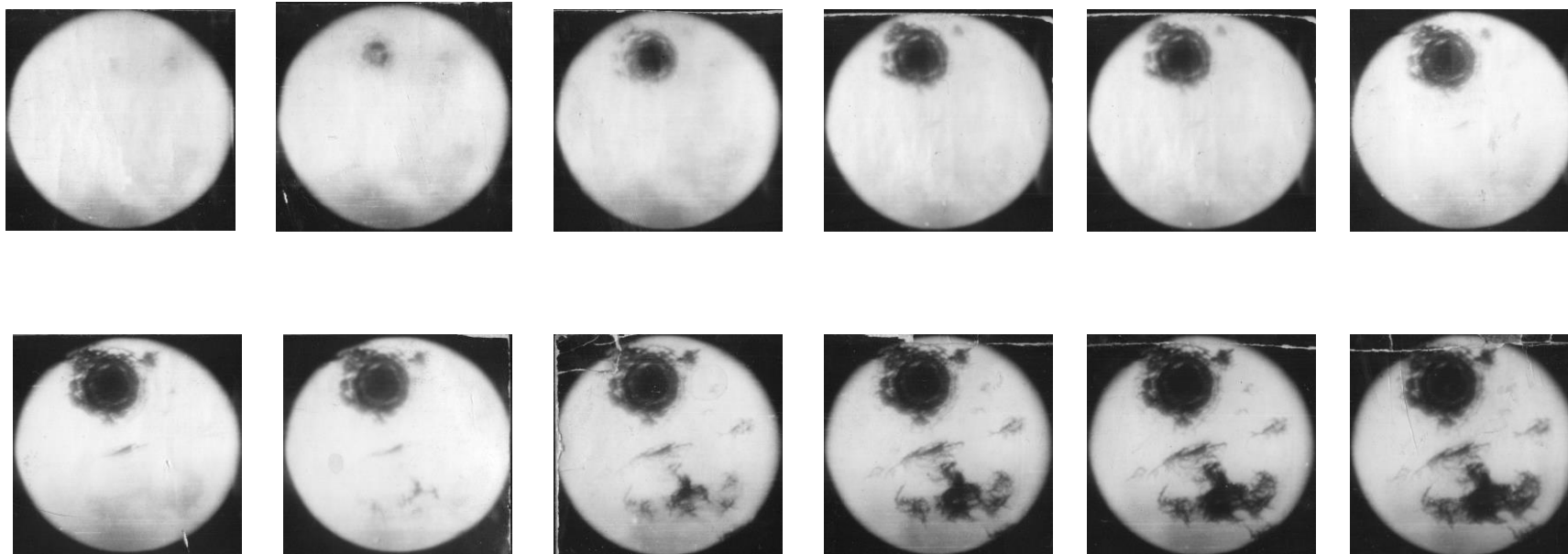
ИГиЛ СО РАН. Испытание космической техники на метеоритный удар перед первым полетом человека в космос



Иллюминатор космического корабля «Восток» после воздействия метеорита



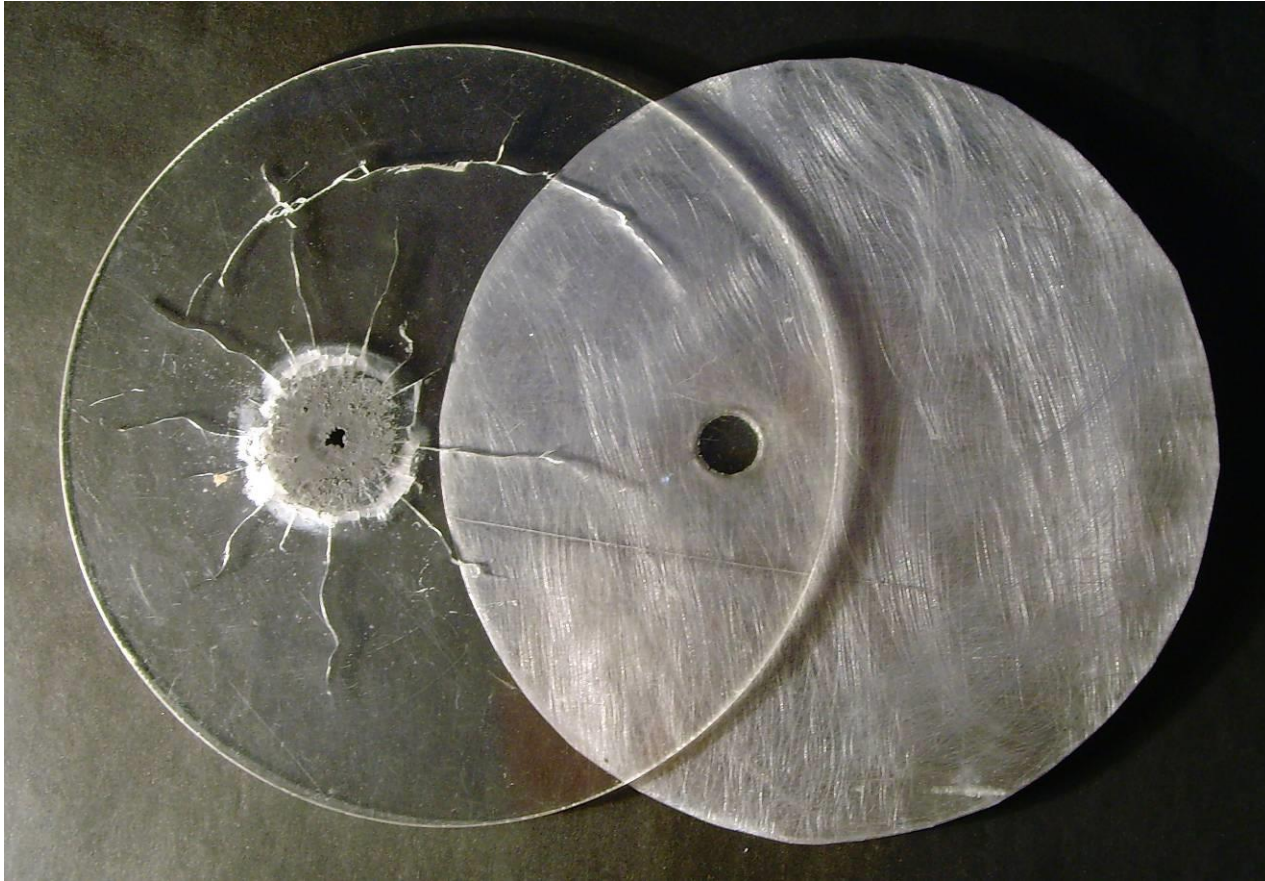
Институт гидродинамики.
Конец 50-х – начало 60-х годов.
Проблема защиты от метеоритного удара.



Испытание иллюминатора космического корабля «Восток», скафандра космонавта и трубопроводов КА на удар метеорита.

Кадры скоростной съемки. Видно разрушение в области второго фокуса – хотя туда метеорит не попадал.

Моделирование ударов метеорита



**Удар метеорита по окну и следующему за ним экрану из алюминия.
Вид спереди**

Моделирование ударов метеорита



**Удар метеорита по окну и следующему за ним экрану из алюминия.
Вид сзади**

Один из 26 двигателей ориентации космического аппарата типа «Восток» и «Космос» (масса КА 3-5 тонн)



Штуцера подводки топлива и окислителя.

На поверхности космического аппарата – 52 трубочки

Трубопроводы, подводящие топливо и окислитель – критические элементы КА, чувствительные к метеоритному удару

Также чувствительными являются солнечные батареи, пробой которых приводит к выходу из строя КА

Сварка взрывом – разработана в ИГиЛ

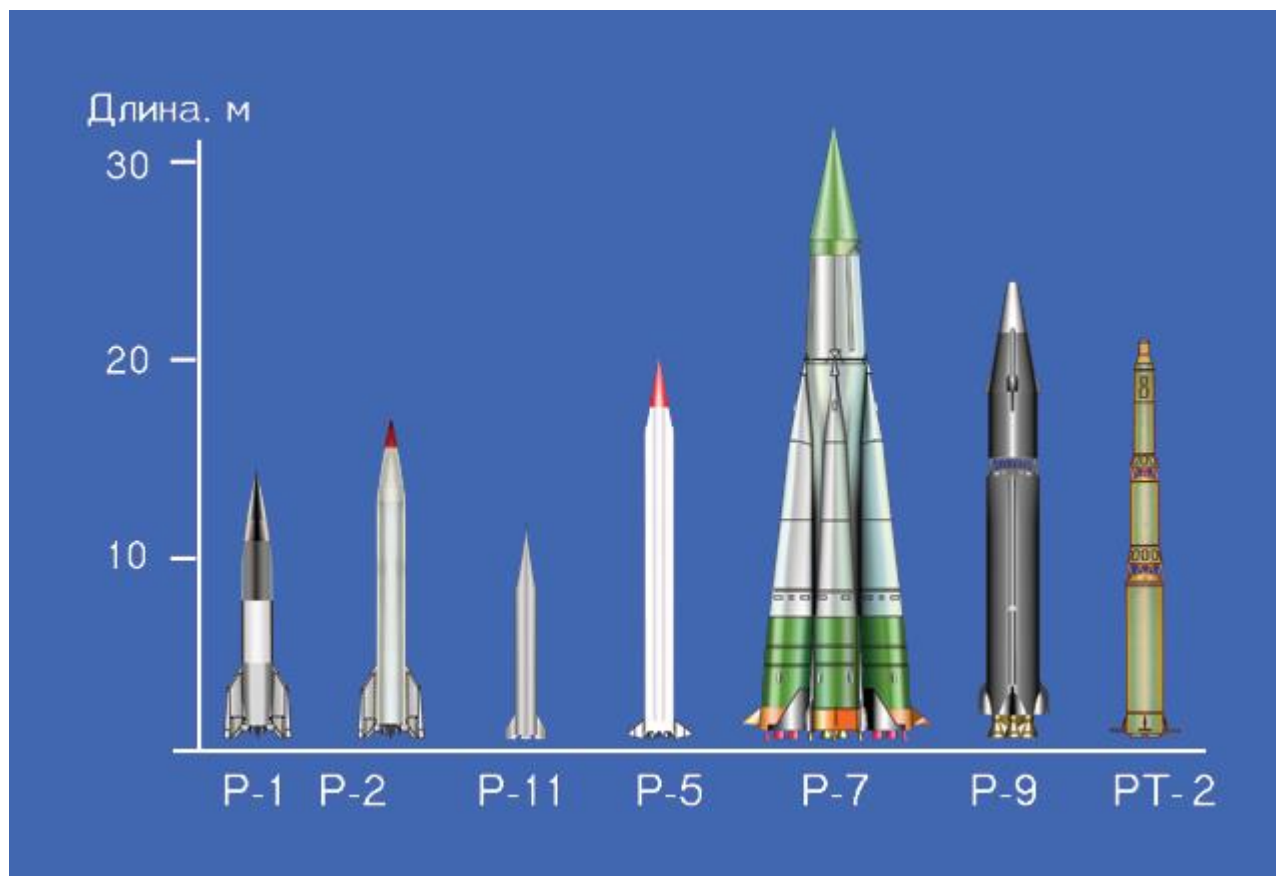


Были изготовлены
сопловые насадки
двигателей из
биметаллических
материалов типа
титан-ниобий и др.



Двигатель РД-107 "Восток" (индекс 8Д74)

Создано 14 стратегических ракетных комплексов, принято на вооружение - 11



1950 - первая баллистическая ракета **P-1**

1952 - **P-2** с отделяющейся головной частью

1955 - **P-11** для сухопутных войск

1956 - **P-5M** с ядерным зарядом

1958 - **P-11M** в мобильном варианте

1959 - **P-11ФМ** для подводных лодок

1960 - первая межконтинентальная баллистическая ракета **P-7**

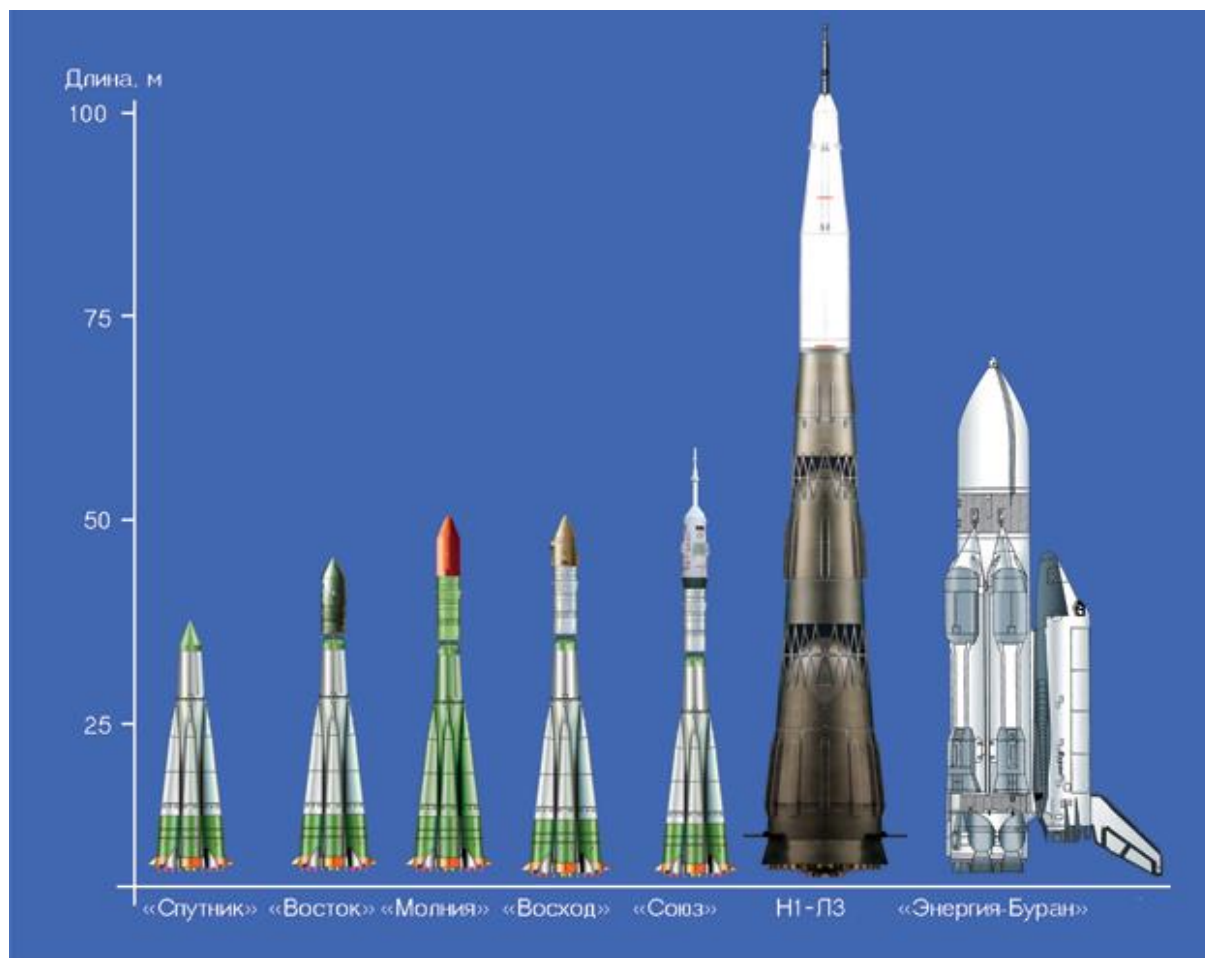
1960 - **P-7A**

1965 - **P-9A**

1968 - **PT-2** на твердом топливе

1972 - **PT-2П**

Ракетно-космические комплексы



1957 - 1958 - Ракета-носитель **"Спутник"** - ИСЗ-1, -2, -3

1958 - 1991 - **"Восток"** - АС "Луна" и пилотируемые корабли

с 1960 - **"Молния"** - связь, исследование Луны, Марса, Венеры

1963 - 1976 - **"Восход"** - пилотируемые корабли и КА "Зенит"

с 1966 - **"Союз"** - пилотируемые и грузовые корабли, исследование Луны

1969 - 1972 - РКК Н1-ЛЗ

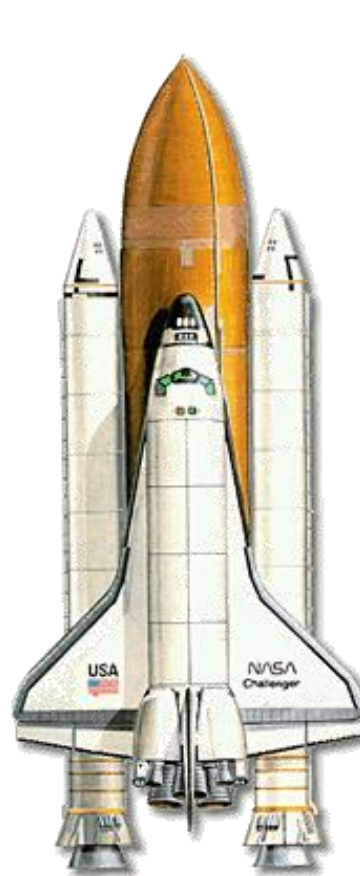
1987 - 1988 - МКС **"Энергия-Буран"**

Различные пути в космос



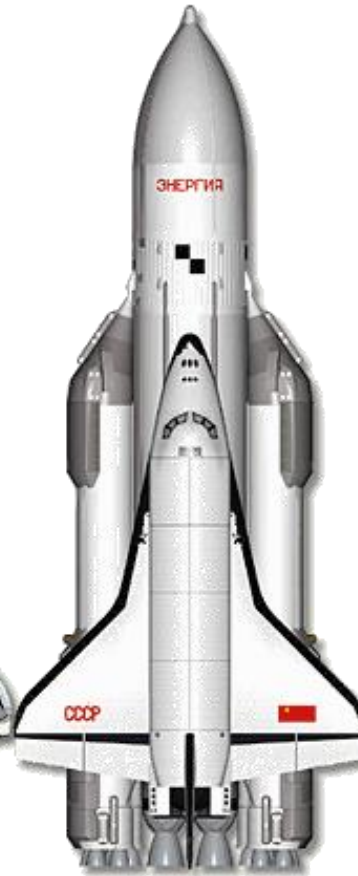
Союз

Протон



Спэйс-Шаттл

Сатурн-5
(Лунная программа)



Буран



Ариан-5

- 1 – многоступенчатая ракета
- 2 – ракета с воздушно-космическим самолетом

3-ий путь – воздушный старт. Многоцелевая аэрокосмическая система (МАКС)



600 тонн взлетный вес

250 тонн на внешней подвеске

<http://www.youtube.com/watch?v=Q-t5ikaBxu8>

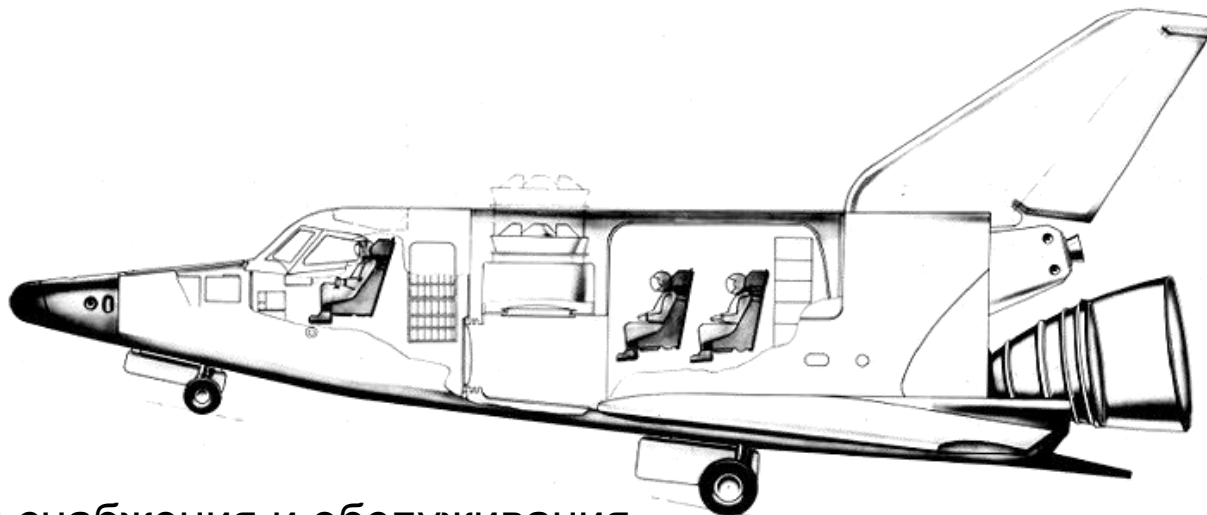
Воздушный старт с самолета-носителя АН-225 «Мрия» на высоте 8,5 км

Преимущества МАКС

МАКС обладает принципиальными преимуществами перед используемыми и проектируемыми системами:

- **кардинальное снижение удельной стоимости выведения полезных грузов на орбиту (до ~ \$800-1000 за кг.)** по сравнению с одноразовыми ракетами-носителями (**\$12,000– 15,000 за кг**) и многоразовыми средствами выведения первого поколения ("Буран", СССР и "Space Shuttle", США);
- использование подвижного воздушного старта орбитальной ступени с самолета-носителя, **исключение необходимости использования космодромов**;
- многоразовость применения:- самолет-носитель до 1000 раз - орбитальный самолет до 100 раз - маршевый ЖРД до 15 раз
- возможность выведения на орбиты с необходимым фазированием и параллаксом относительно аэродрома вылета;
- минимальное акустическое воздействие на поверхность Земли при старте второй ступени;
- возможность широкого маневрирования в продольной и боковой плоскостях (до 2000 км) при возврате с орбиты;
- малые сроки подготовки к повторному вылету; высокая оперативность применения, особенно для спасательных операций:- выход на заданные наземные (морские) районы за 2-3 часа;- выход к космическим объектам за 2-6 часов;- срочная доставка информации на Землю.
- **возможность возврата полезных грузов (до 4,6 т)** и их многоразового использования;
- возможность возврата МАКС при отмене пуска;
- повышение надежности и безопасности выполнения космических операций;
- экологическая чистота (сокращение полей падения ступеней с отсутствием постоянных зон отчуждения и применение нетоксичных компонентов топлива);
- **реализация проекта не требует введение в действие дополнительных производственных мощностей** при многолетней гарантированной загрузке более 400 тыс. рабочих мест в России и Украине.

Модификации ОС МАКС (2 из 5)



ТТО -1 для снабжения и обслуживания
орбитальных станций или
спасательных операций



ТТО -2 для снабжения и
обслуживания беспилотных
(автоматических) орбитальных
платформ

\$800-1000 за кг вместо \$12,000– 15,000 за кг

Элементы 2-й ступени



Внешний топливный бак 2 ступени для криогенных компонентов топлива

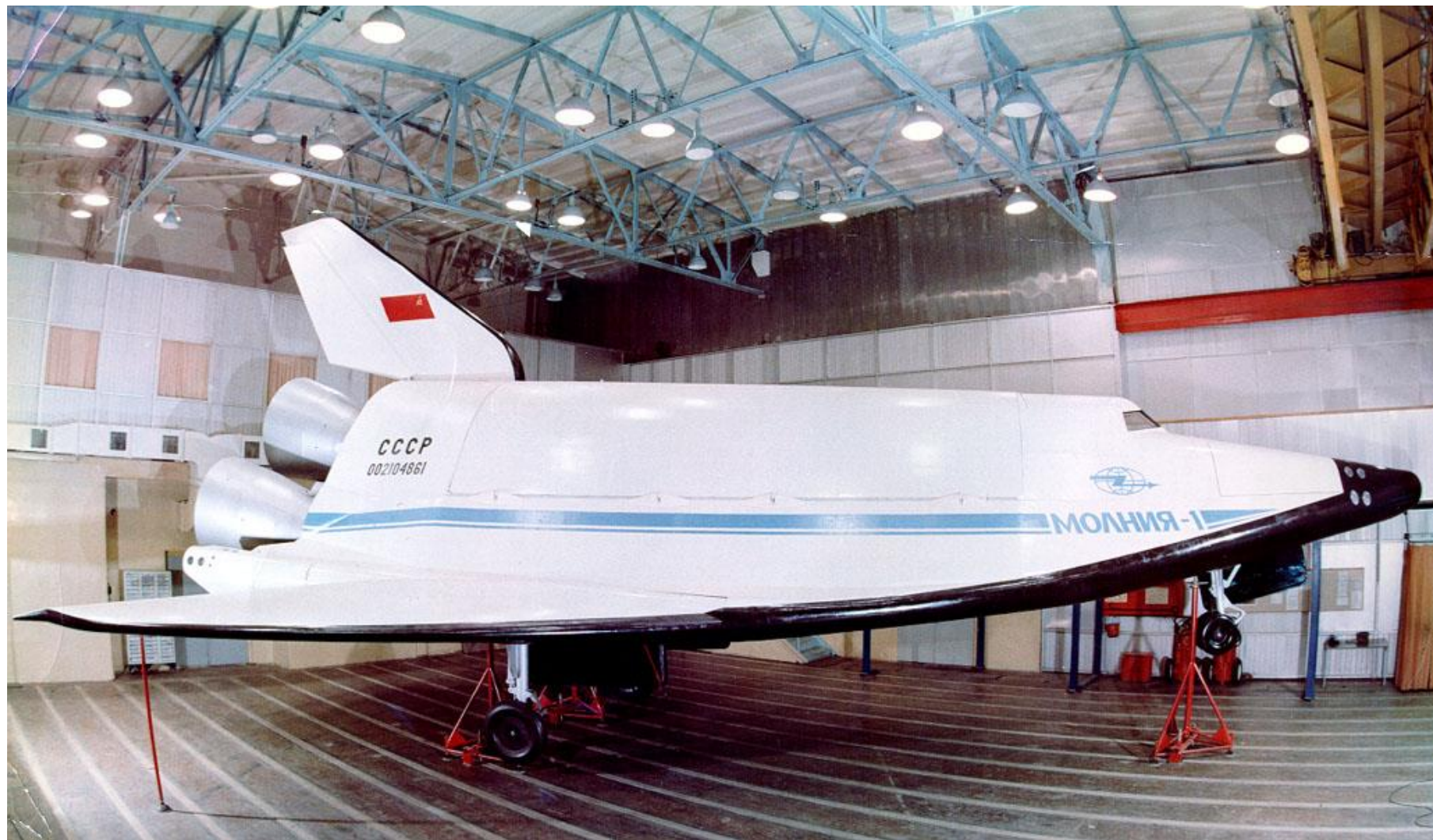


РД-701 –
трехкомпонентный
двигатель (водород
кислород - керосин)

Внешний топливный бак– вид сзади



Вторая ступень – орбитальный самолет МАКС. Вид сбоку



Орбитальный самолет МАКС. Вид сзади

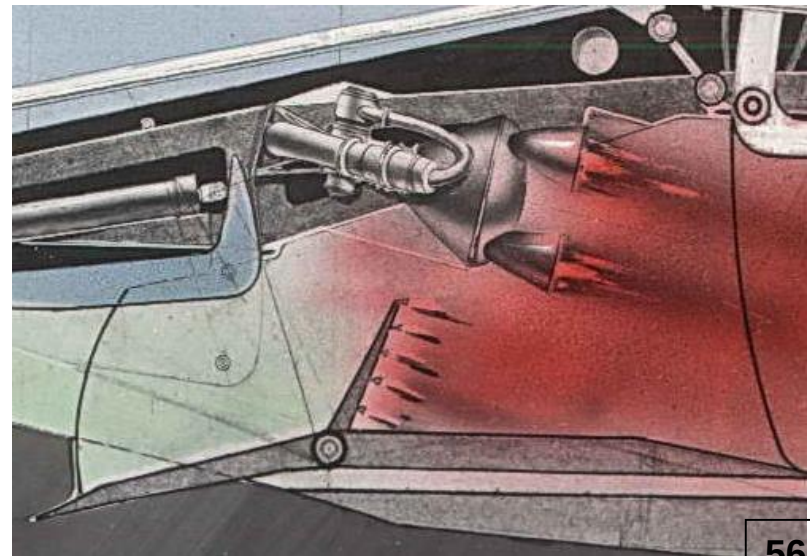
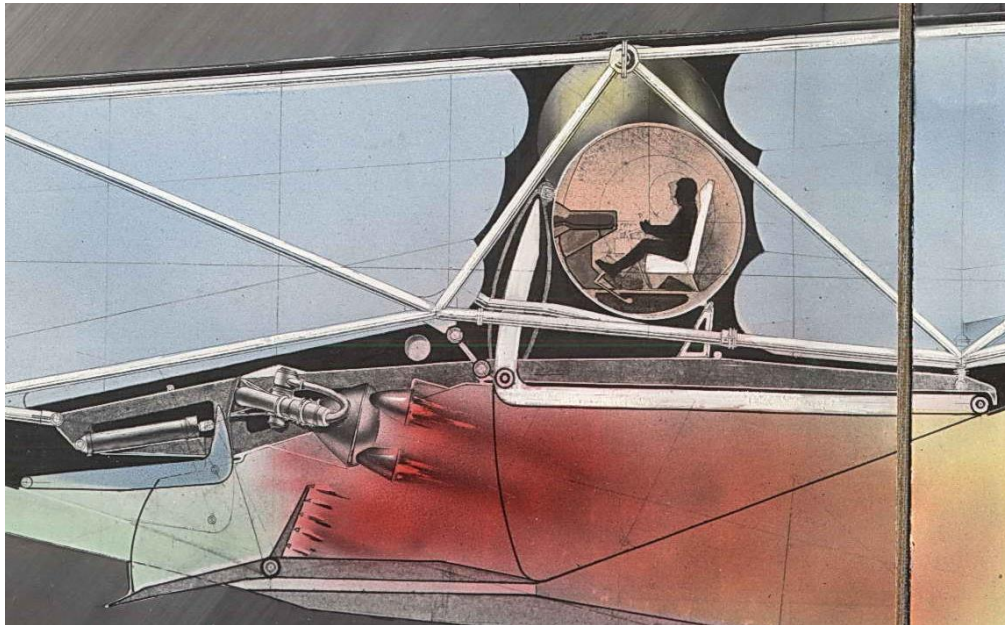


Существует **четвертый путь** – воздушно-космический **корабль с прямоточным детонационным двигателем**. Был предложен и исследован в СССР в начале 60-х годов

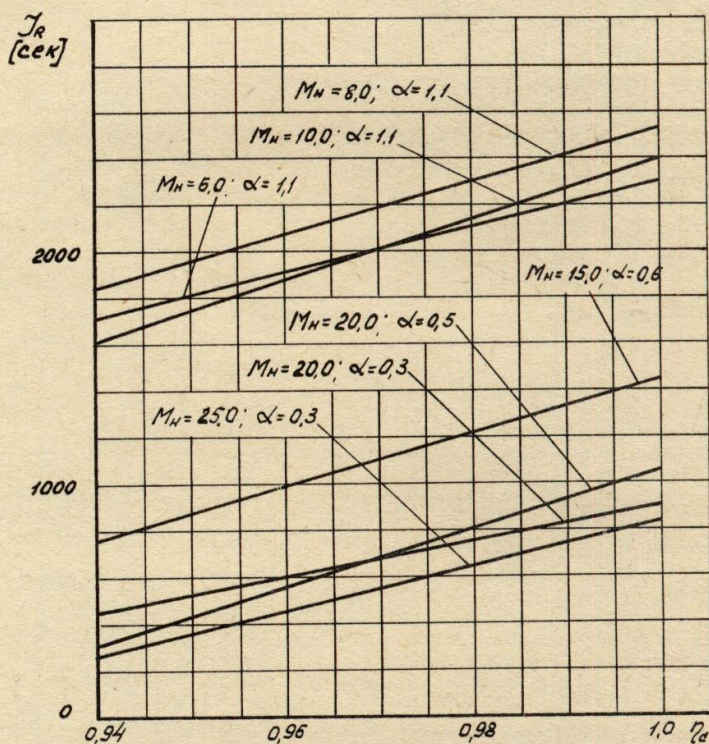
Особенности параметров ВКК

- **Взлет с ВПП, выход в космос и посадка на ВПП – без дополнительных ступеней**
- Боковой маневр при посадке – 7-8 тыс. км То есть – **посадка на любой аэродром СССР на любом витке**
- Взлетный вес 120-200 т
- Топливо – водород
- Окислитель – воздух, кислород. Кислород – только для полета в вакууме.
Не нужно брать с собой много кислорода, который **в 16 раз тяжелее** водорода.

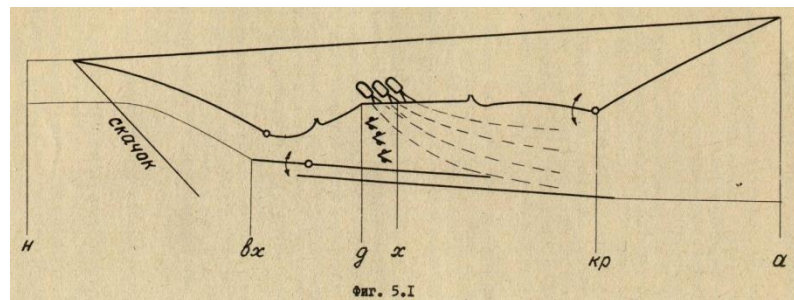
ВКК – общий вид – схема – 1966 г.



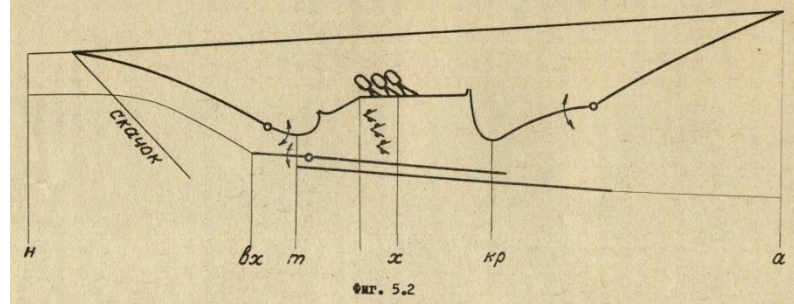
Прямоточный двигатель с горением топлива в режиме детонации. Четыре скоростных режима



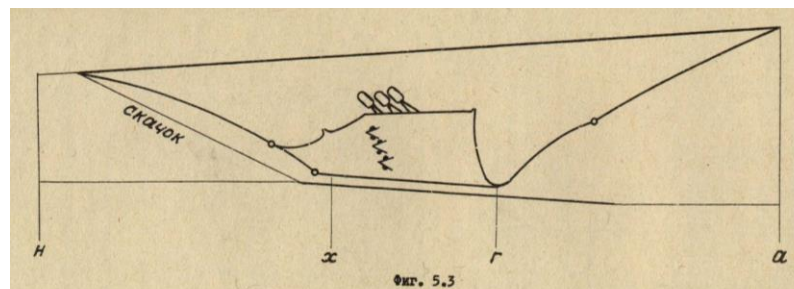
ФИГ. 5.22



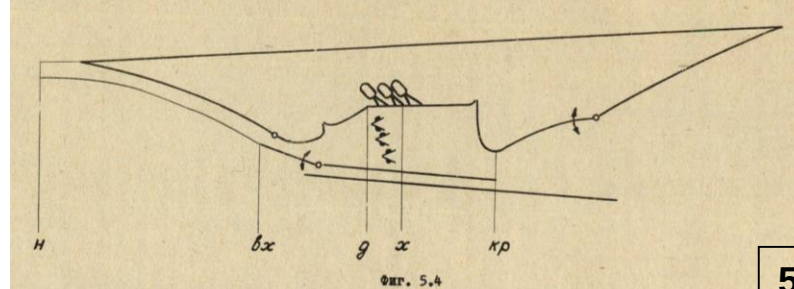
ФИГ. 5.1



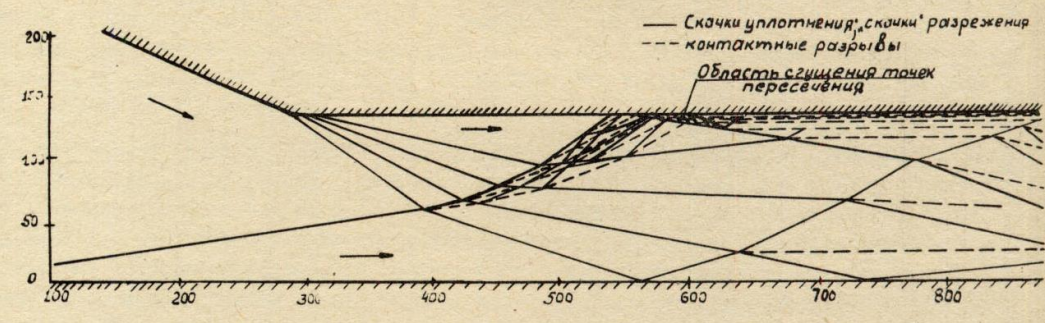
ФИГ. 5.2



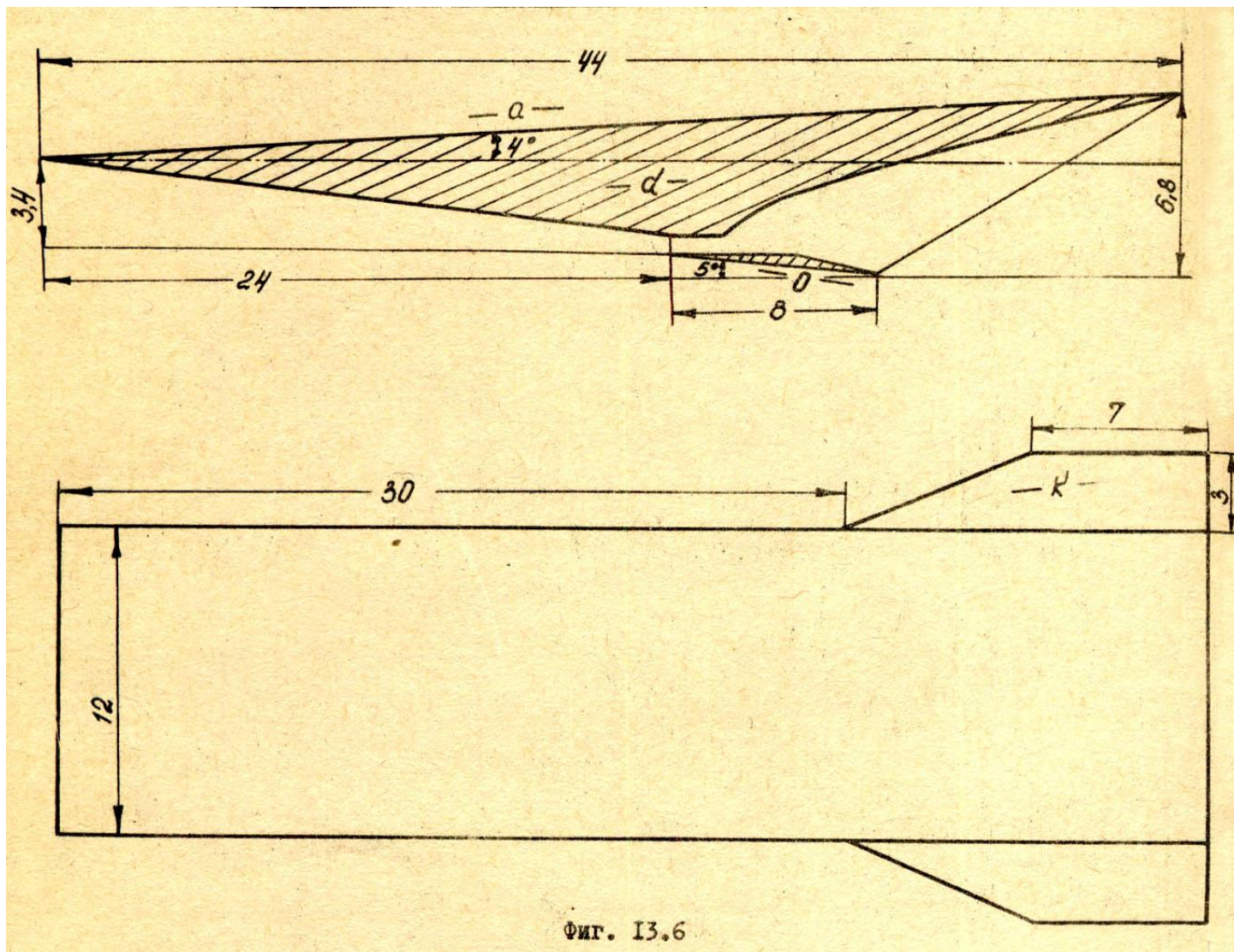
ФИГ. 5.3



ФИГ. 5.4

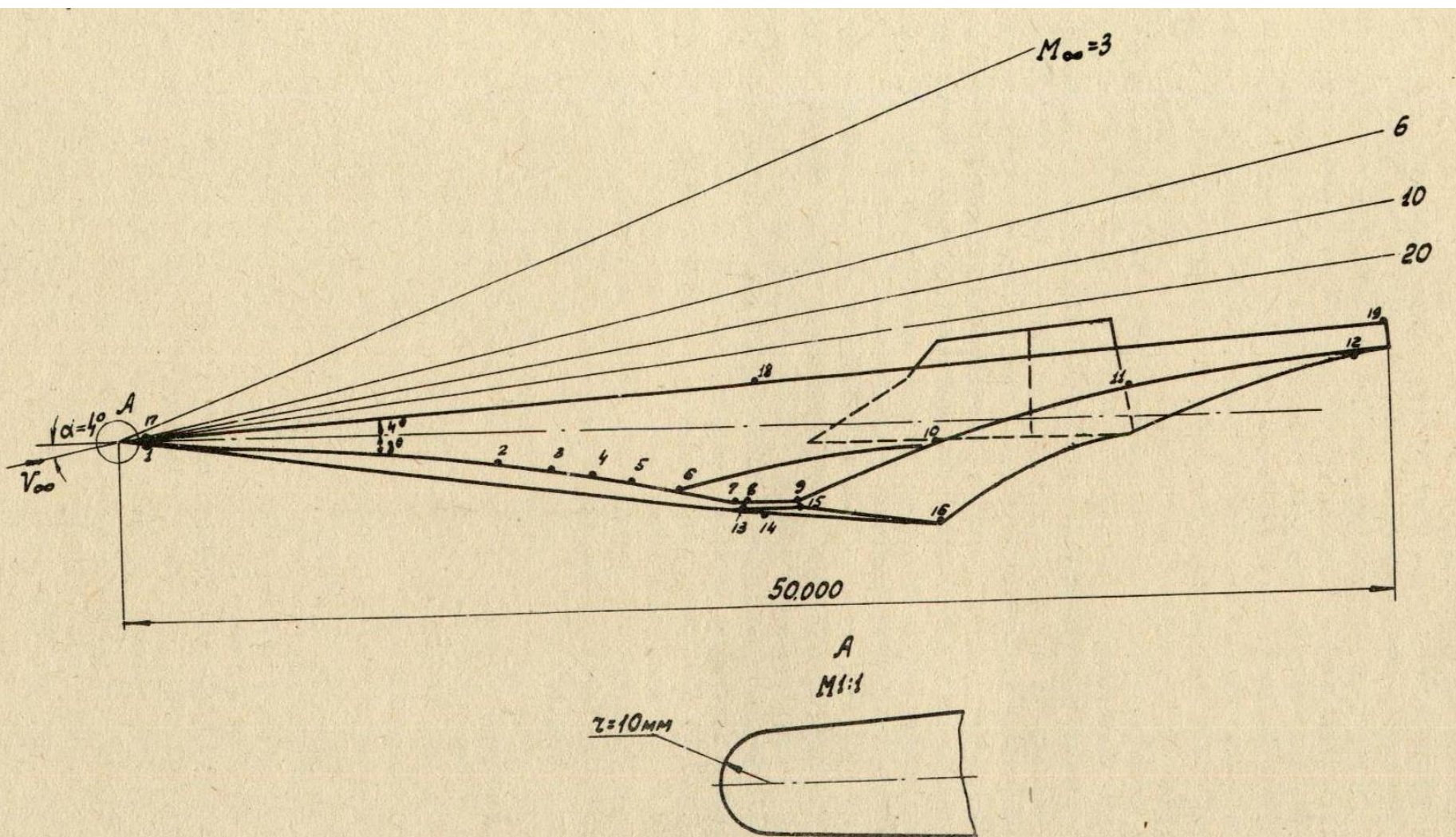


Компоновка ГПВРД на ВКС при просчете центровки.
Видно, что одна из стенок двигателя – корпус самолета

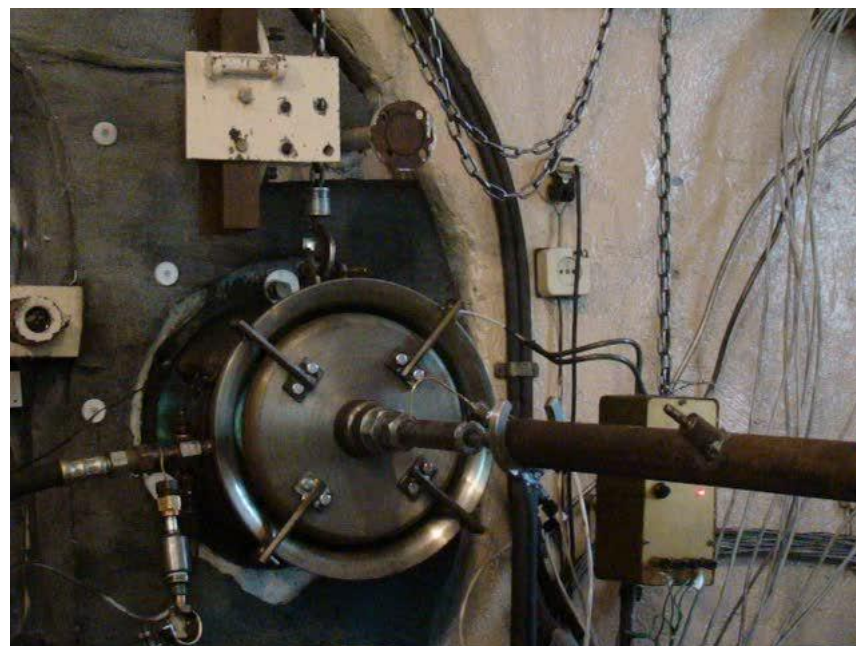
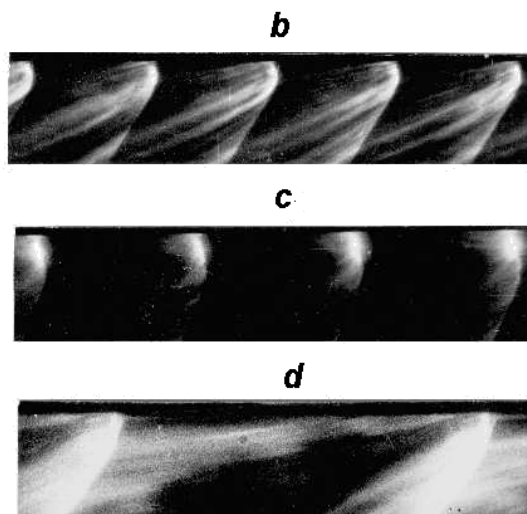
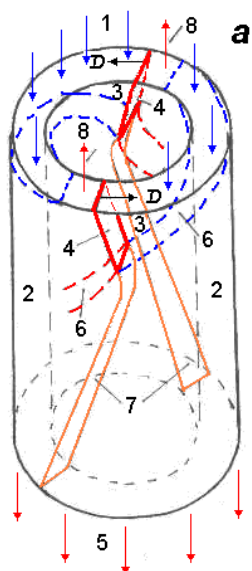


Воздушно-космический самолет – положение скачка уплотнения (ударной волны) при разных скоростях.

Геометрия корпуса задается формами ударной волны и погранслоя



Институт Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева с 1965 г разработал ряд конструкций ГПВРД



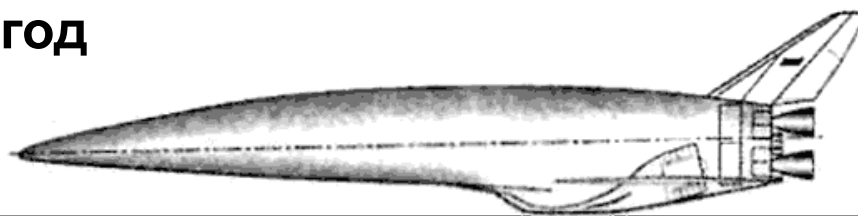
Детонационный двигатель:

- импульсный;
- с вращающейся ДВ;
- прямоточный

Варианты многоцелевого воздушно-космического самолета (МВКС)

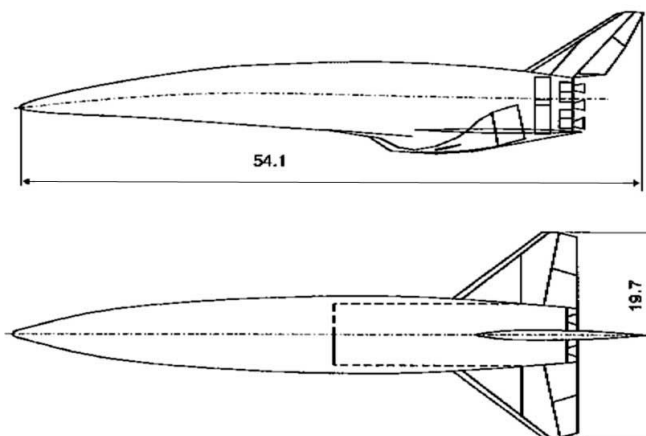
- 1 сентября 1986 года. Конкурс МО по созданию МВКС.
- Проекты ОКБ Туполева («Ту-2000»), ОКБ Яковлева («МВКС») и НПО «Энергия» («ВКС»).

С 1993 по 1996 год



Одноступенчатый воздушно-космический самолет «МиГ-2000»

Длина фюзеляжа — 54,1 метра,
базовый диаметр — 19,7 метра)
Взлетный вес — 300 тонн,
Вывод полезной нагрузки до 9 тонн
на орбиту высотой 200 километров с
наклоном 51°.



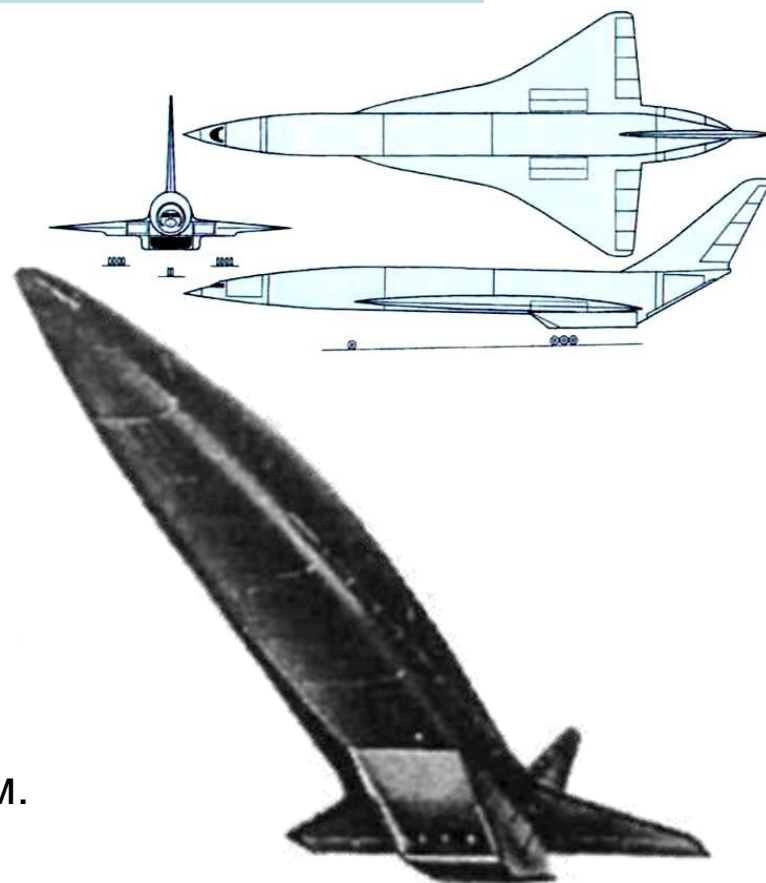
ВКС Ту – 2000

1992 год

«Ту-2000А»: прототип
длина — 60 метров,
размах крыла — 14 метров,
масса пустого — 40 тонн,
взлетная масса — от 70 до 90 тонн.

«Ту-2000»: грузо-пассажирский
Взлетная масса 210–280 тонн.
Доставка от 6 до 10 тонн на орбиту 200–400 км.

«Ту-2000Б» двухместный гиперзвуковой
космический бомбардировщик
Дальность 10 000 километров
Взлетный вес 350 тонн.
Скорость в 6 Махов на высоте 30 километров.



Одноступенчатый воздушно-космический самолет «2000» («Ту-2000»)

Зарубежные фирмы продолжают работы по ВКК

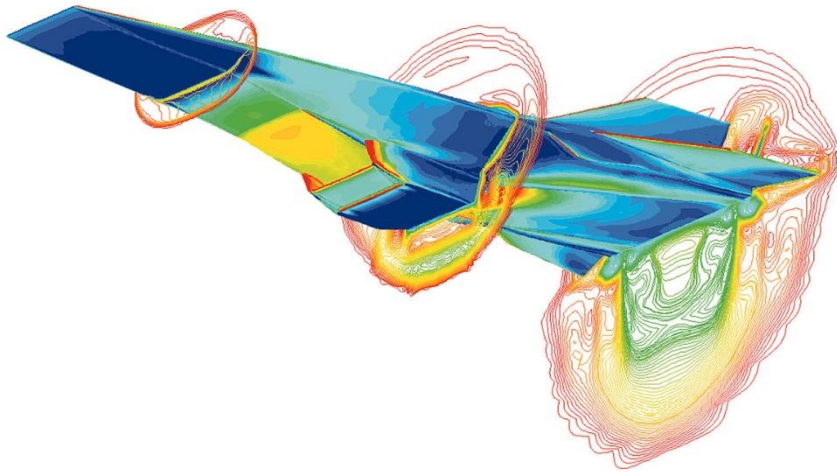


HTV-2 20M



X43-A 10M

2001-2004 годы. NASA. Вам этот самолет ничего не напоминает ?



X-43. Расчет тепловой нагрузки.



**NASA X-43 Hyper-X Program
Испытания**

2001-2004 годы. Три полета со стартом от разгонной ракеты Пегас. Из них 2 неудачных. Максимальная достигнутая скорость 9,8 М. Максимальная дистанция (до взрыва) – 1500 км.

Проект пока остановлен. Действующий двигатель должен быть разработан к 2020 году

Противоракета ПРС-1/53Т6 ближнего комплекса ПРО Москвы

- Противоракета ПРС-1/53Т6 ближнего комплекса ПРО Москвы, которая, надеюсь, стоит на дежурстве сейчас.
<http://rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/53t6/53t6.shtml>
- За 4 секунды она разгоняется до 5,5 километров в секунду (это 16 махов, а для спутника нужно 7,9 км/с) и оказывается на высоте 30 км.
При стартовой массе ракеты 10 тонн тяга двигателей 1000 тонн. Ускорения - до 230 g.
Подробнее, с картинками, см. <http://rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/53t6/53t6.shtml>
- Очень сложна была при таких скоростях и ускорениях проблема с механикой и с радиоуправлением - через две с небольшим секунды оболочка ракеты нагревается настолько, что ракета идёт в плазменной оболочке, непрозрачной для радиоволн.
- Работы шли долго, останавливались и возобновлялись. Шла перестройка. В 1995 г. в составе комплекса комплекса А-135 и РЛС ДОН-2 последняя версия ПРС-1/53Т6 была принята на вооружение.
- Кстати, работы по программному обеспечению и системам управления ракет 53Т6 с помощью машин 5Э92, 5Э51 а затем Эльбрус-1 и Эльбрус-2 проводились КБ СП НФ ИТМиВТ третьекурсниками и, далее, выпускниками мехмата НГУ (спец. прикладная математика) с 1970 года. Это было в здании по адресу Детский проезд, 6. Все окна здания, вплоть до 4 этажа, были зарешечены. Никаких табличек. Работы, естественно были засекречены. Но сейчас, когда все решетки на этом доме сняты, видимо стоит рассказать.



53Т6



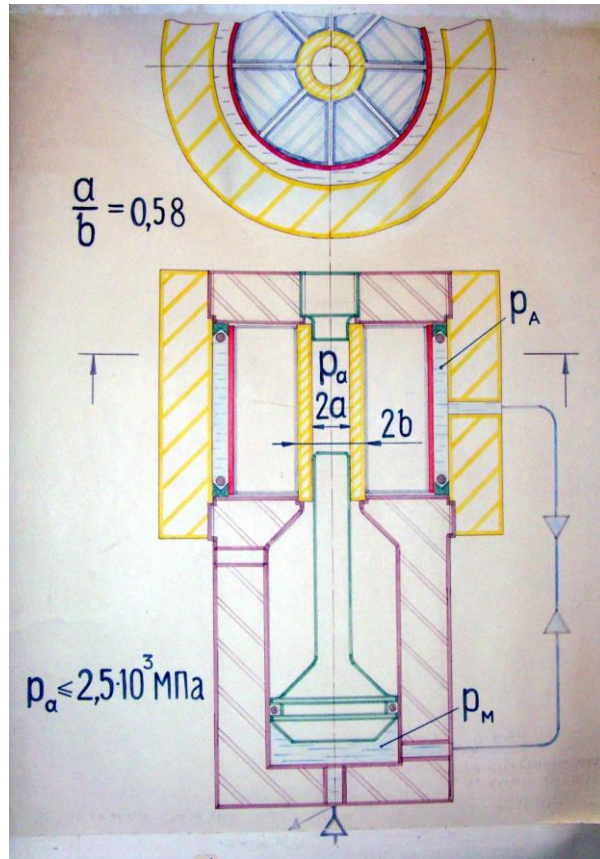
РЛС ДОН-2

ИГИЛ СО РАН. 1969 – 1975. Высокоскоростная гиперзвуковая аэродинамическая труба А-1. Заказ ЦАГИ – 1/10 от полного размера.



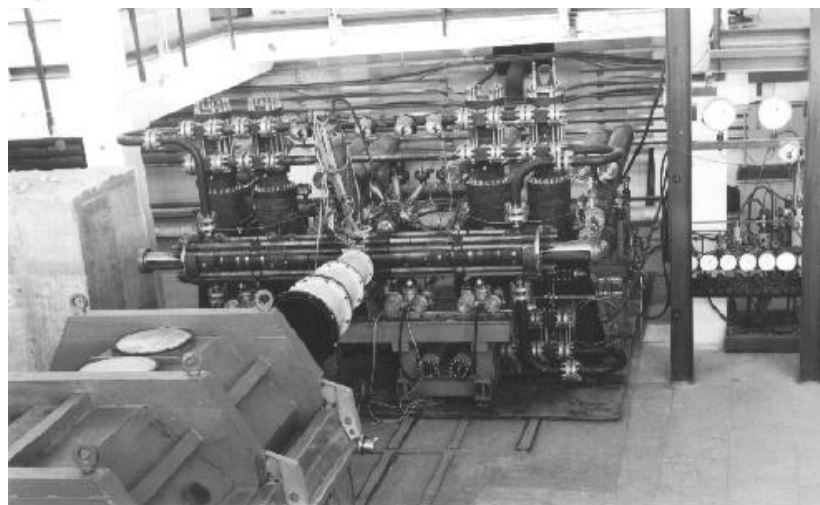
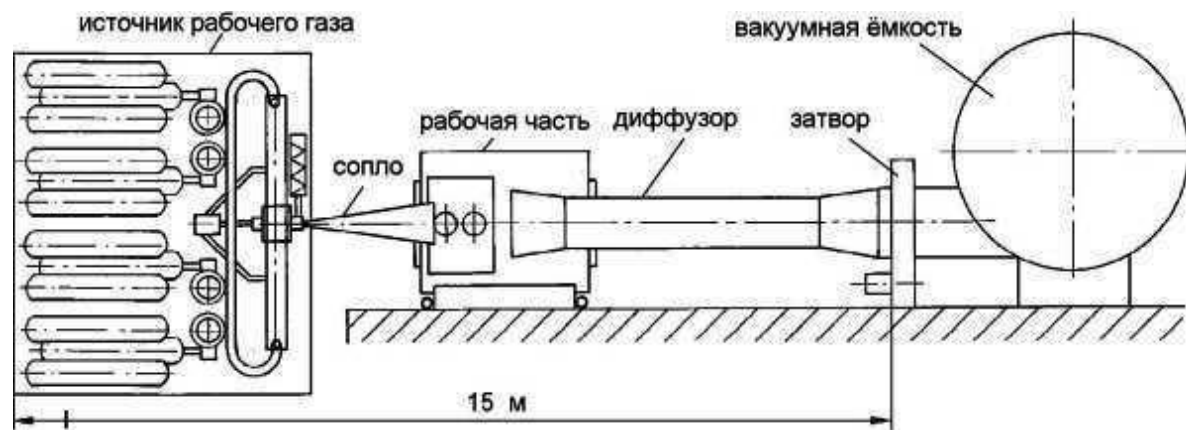
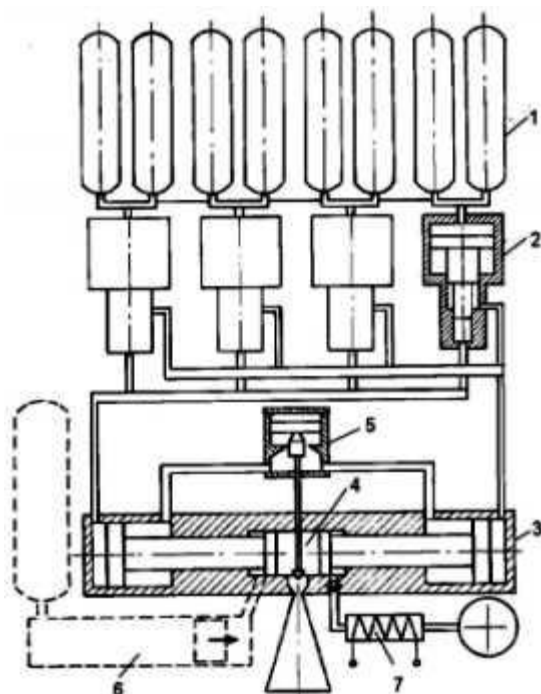
Давления – от 10^{-6} до 15000 атм

ИГиЛ СО РАН. Высокоэнтальпийная гиперзвуковая аэродинамическая труба А-1

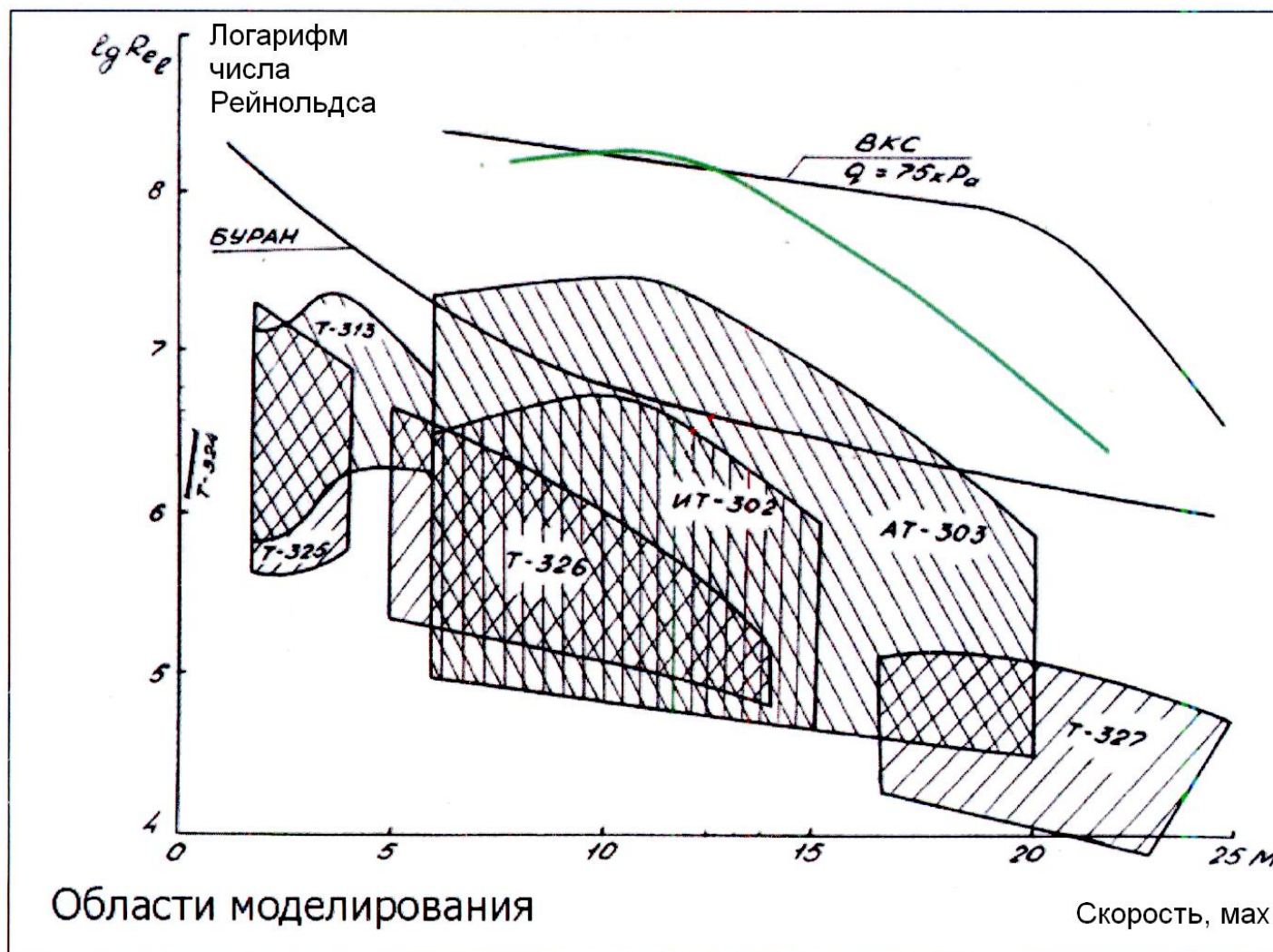


- Моделирование коридора входа баллистических объектов в атмосферу по скоростям и числам Рейнольдса – от орбиты до поверхности Земли. Заказчик – ЦАГИ
- Рабочая среда – воздух (а не водород)
- Давление в форкамере 15 тысяч атм.
- Температура в форкамере 3000°C
- Сопло – медь, объемно обогащенная кислородом методом взрыва
- Уплотнение цилиндров компрессора – индий. Диаметр поршня – больше диаметра цилиндра

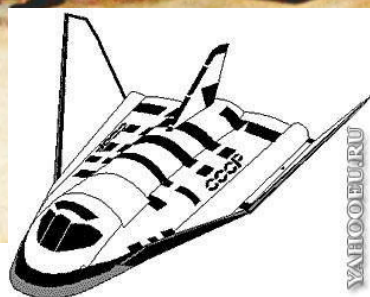
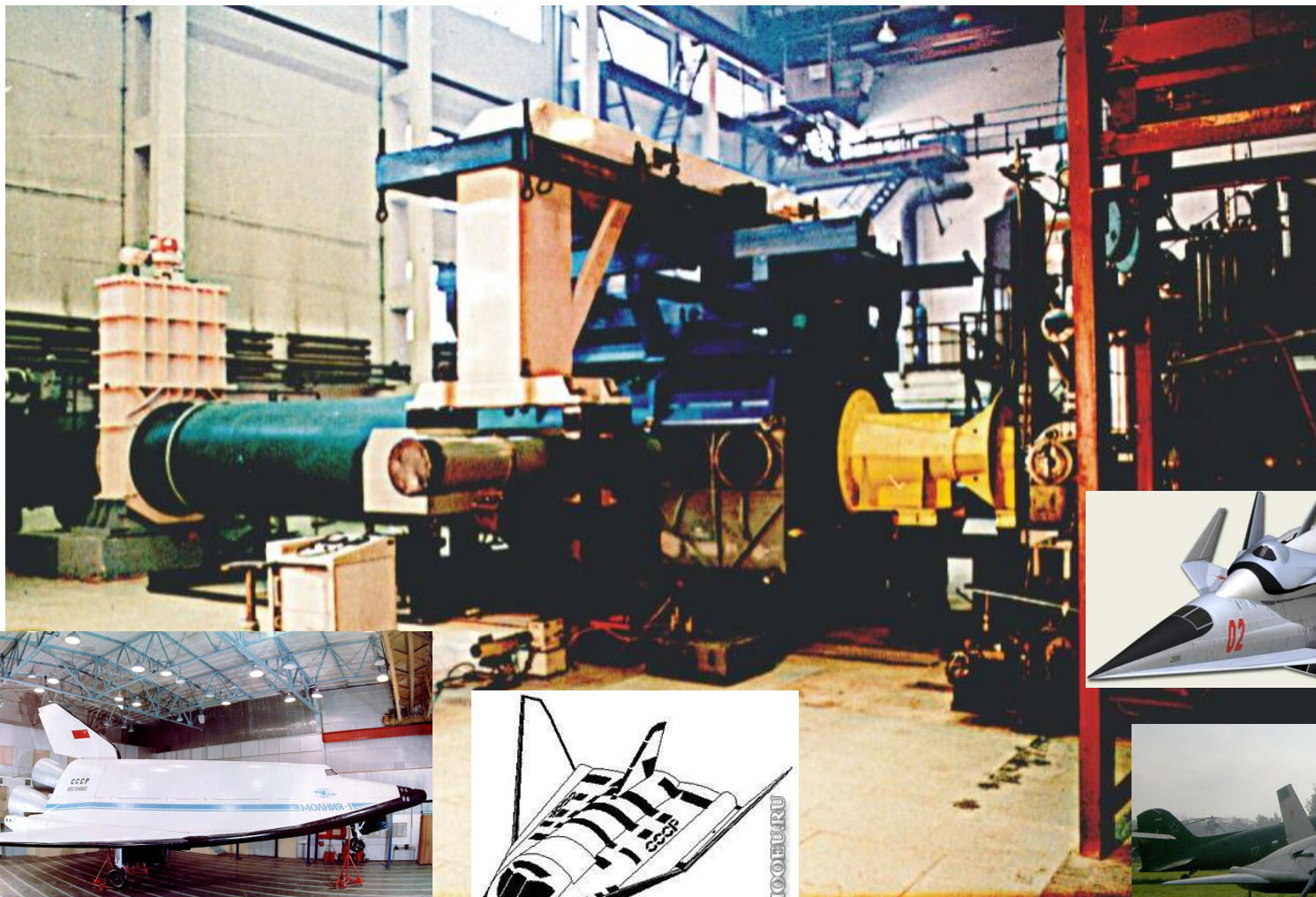
ГИПЕРЗВУКОВАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА АТ-303



Области чисел Рейнольдса ($Re = \nu L\rho/\eta$) и скоростей
 для ВКС и для челночного корабля типа «Буран».
 Области моделирования аэродинамических труб



Моделирование полета воздушно-космических самолетов ГИПЕРЗВУКОВАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА АТ-303



Испытания полета воздушно - космических самолетов и ракет.
Земля – космос – Земля - на всех этапах.
(ИГИЛ СО РАН, ИТПМ СО РАН, КТИ ГИТ СО РАН)



НГУ. НИЧ ОАИ (отдел атмосферных исследований) Воздействие на КА факторов солнечной активности и электризации

Разработка АКВС - аппаратуры контроля внешней среды космического аппарата

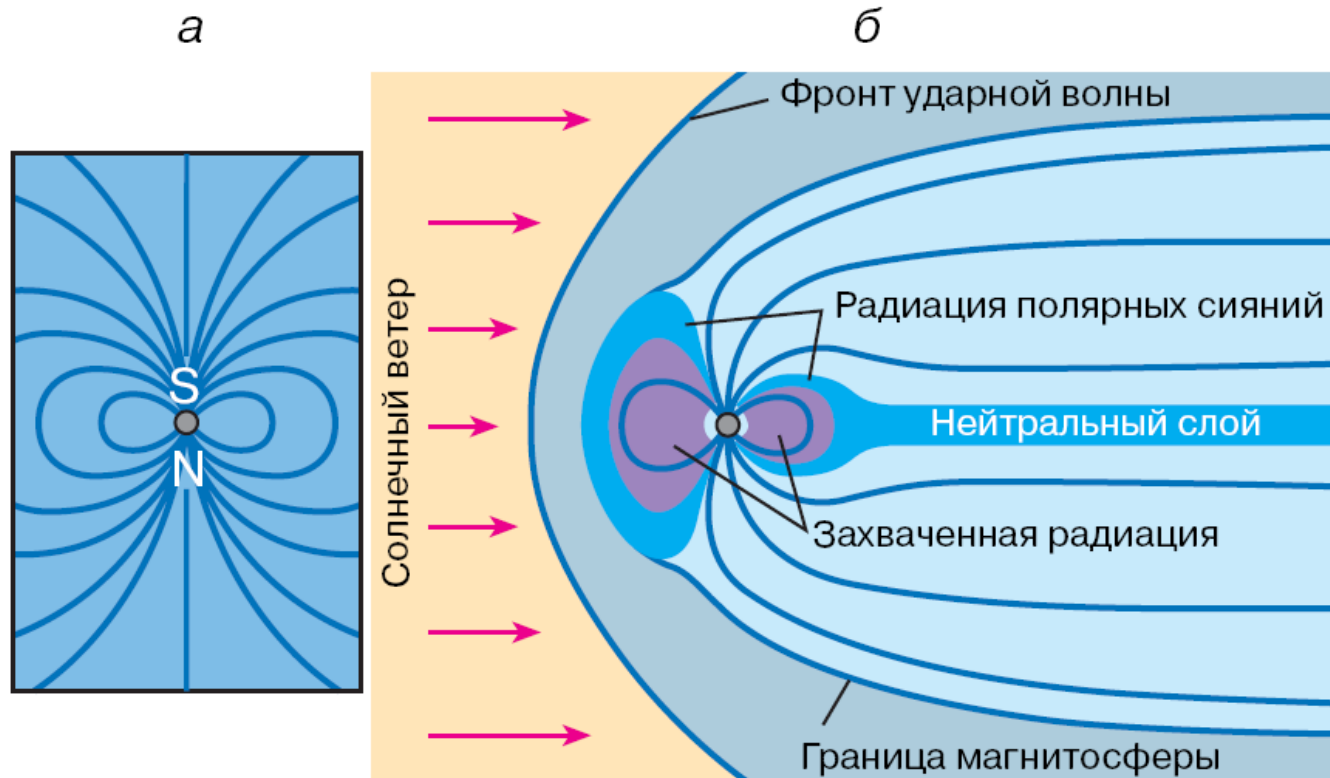
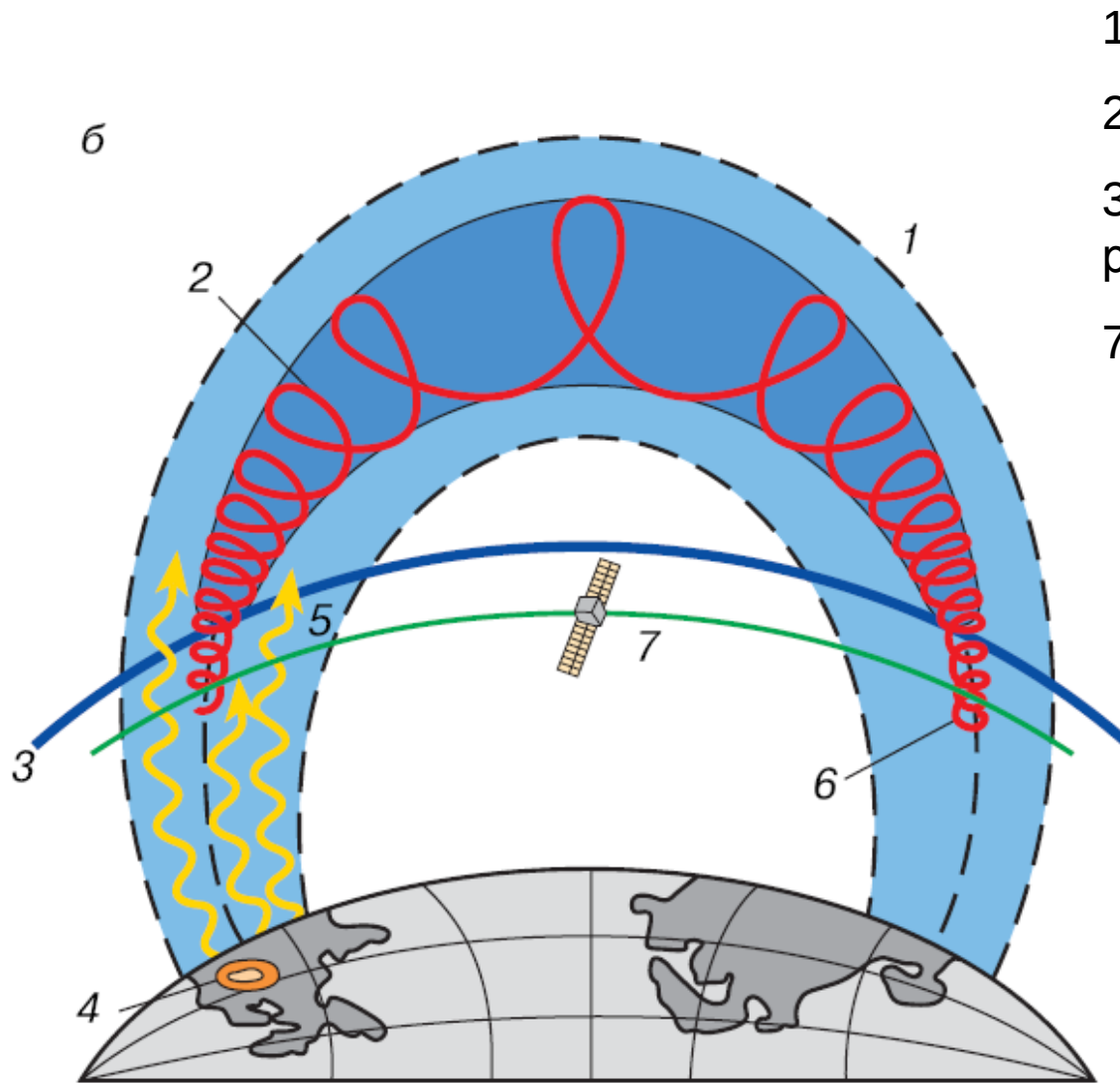


Рис. 1. а – дипольное магнитное поле, б – магнитное поле Земли, трансформированное потоком солнечного ветра (меридиональная плоскость)

Прохождение спутника через радиационные пояса

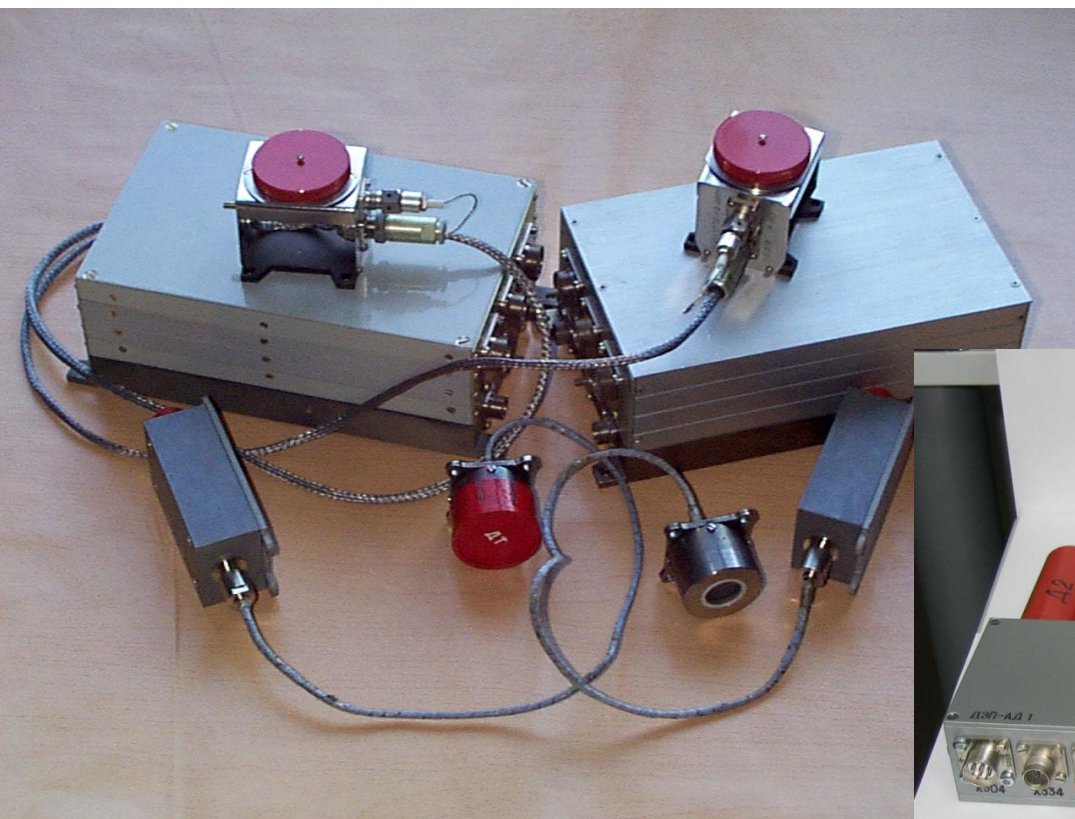


- 1 – геомагнитное поле,
- 2 – траектория частицы,
- 3 – нижняя граница радиационного пояса
- 7 – траектория спутника

- Навигационные спутники «Навстар» и ГЛОНАСС летают в радиационных поясах
- Геоостационарные спутники при вспышках на солнце проходят через ударную волну и сверхзвуковой поток плазмы 2 раза в сутки

АКВС - аппаратура контроля внешней среды

Является штатной (обязательной) для всех спутников на верхних орбитах . Изготавливается в НГУ (Новосибирск)

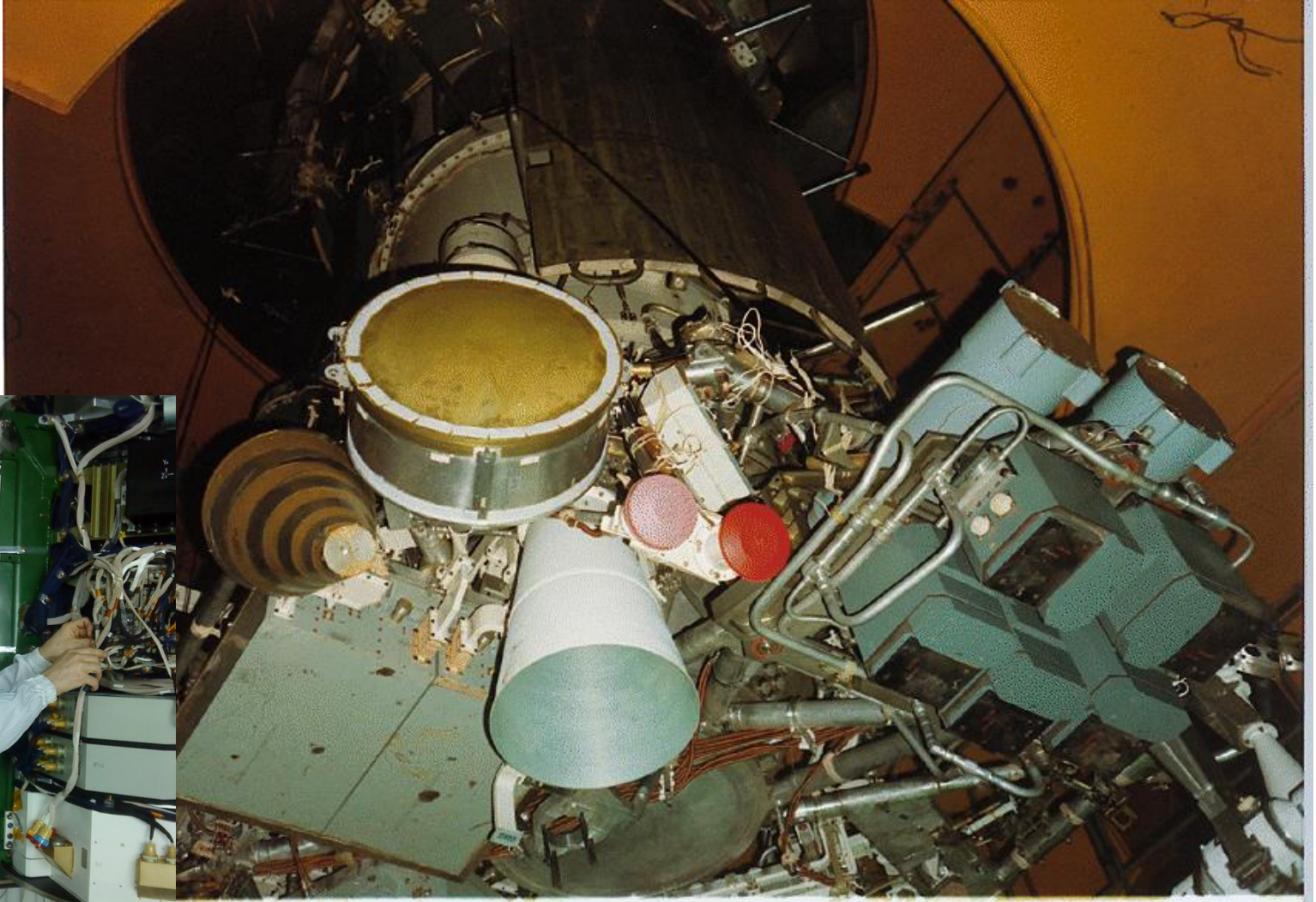


Непрерывный контроль
Напряженности электрического поля,
Пробоев по поверхности и по объему
Давления в вакууме возле КА

Непрерывный контроль
Заряда (напряжения КА относительно окружающей плазмы)
Потоков частиц
Накопленной дозы излучения



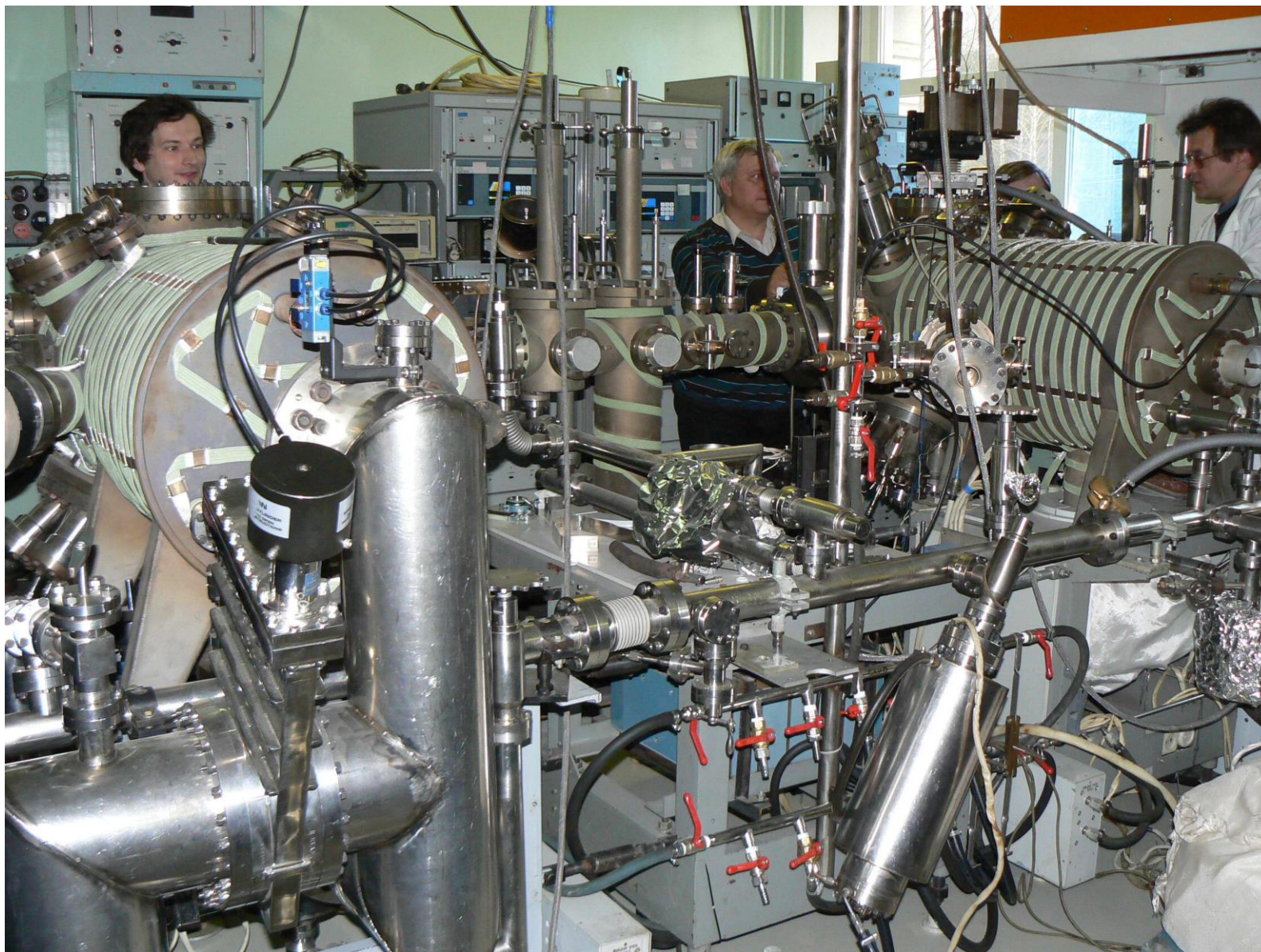
АКВС с дополнительным датчиком микрометеоритов



Пример спутника с обязательной системой АКВС



Установка для молекулярно лучевой эпитаксии



Давления – 10^{-9} – 10^{-12} torr (10^{-12} – 10^{-15} атм)

Ускоритель ВЭПП-3

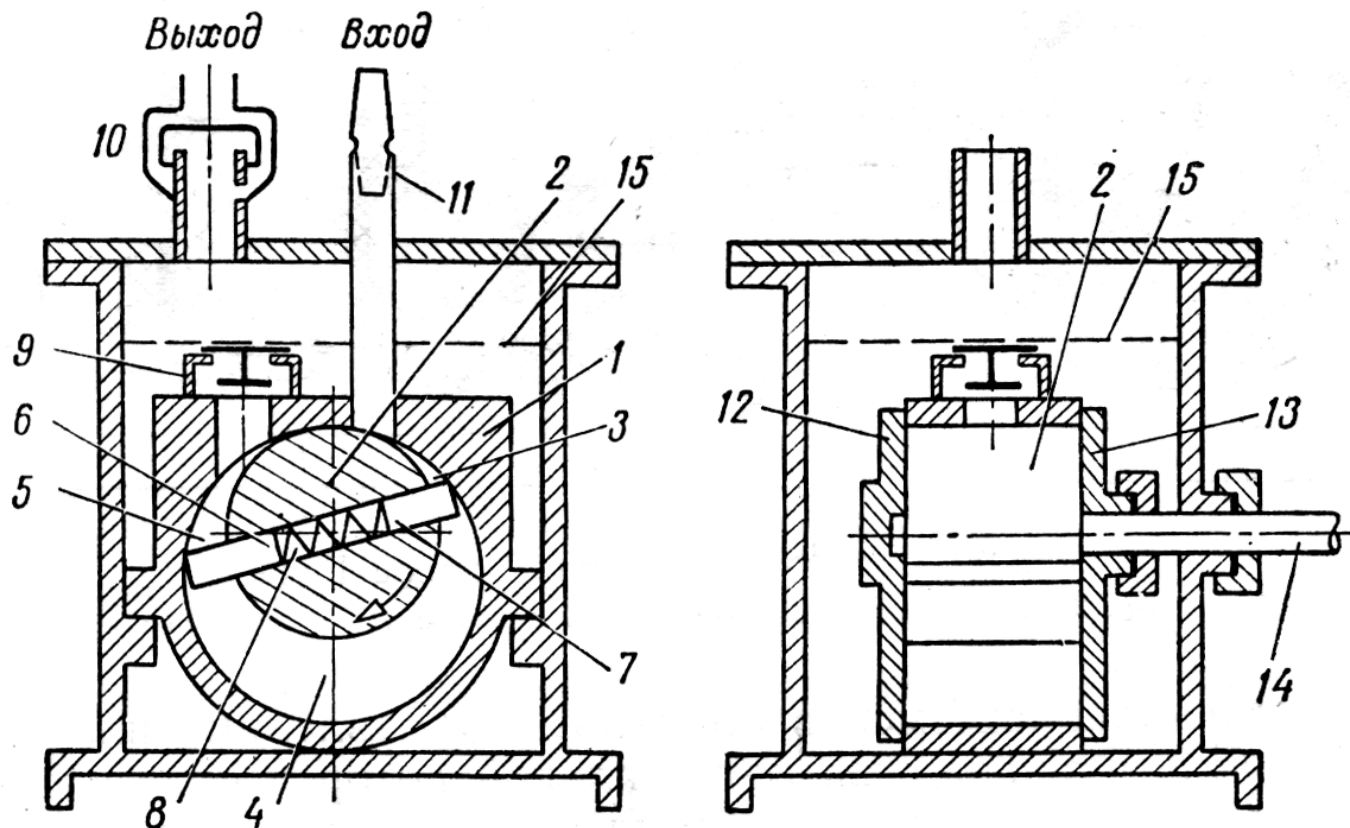


Давления – $10^{-9} - 10^{-11}$ torr ($10^{-12} - 10^{-14}$ атм)

Вакуумные насосы

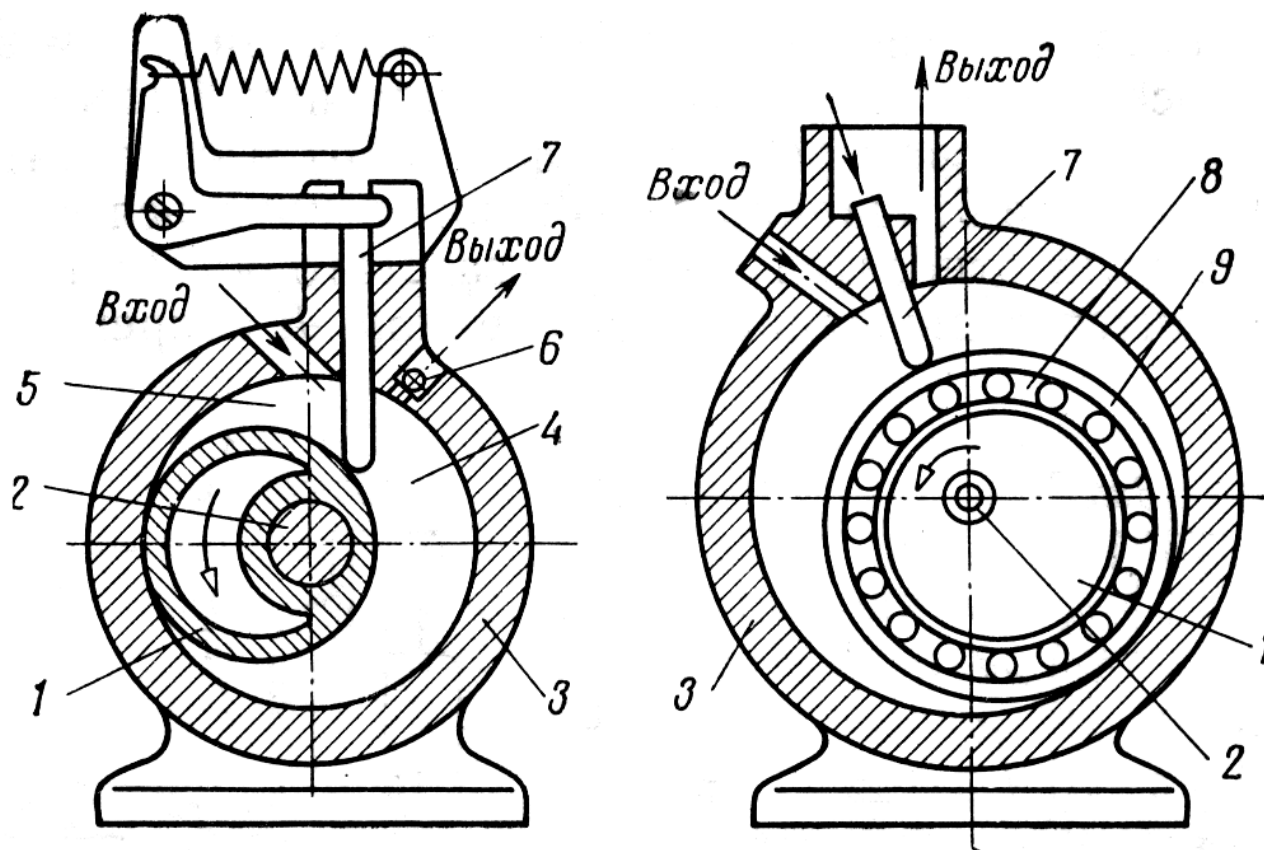
- Механический форвакуумный $10^3 \div 10^{-3}$ torr
- Водоструйный $10^3 \div 20$ torr
- Цеолитовый форвакуумный безмаслянный $10^3 \div 10^{-4}$ torr
- Спиральный форвакуумный насос $10^3 \div 10^{-2}$ torr
- Диффузионный пароструйный $10^{-1} \div 10^{-6}$ torr
- Магниторазрядный $10^{-3} \div 10^{-9}$ torr
- Турбомолекулярный $10^{-2} \div 10^{-8}$ torr
- Сублимационный $10^{-8} \div 10^{-11}$ torr
- Криогенный сублимационный $10^{-8} \div 10^{-13}$ torr

Механический форвакуумный масляный насос. $10^3 \div 10^{-3}$ torr



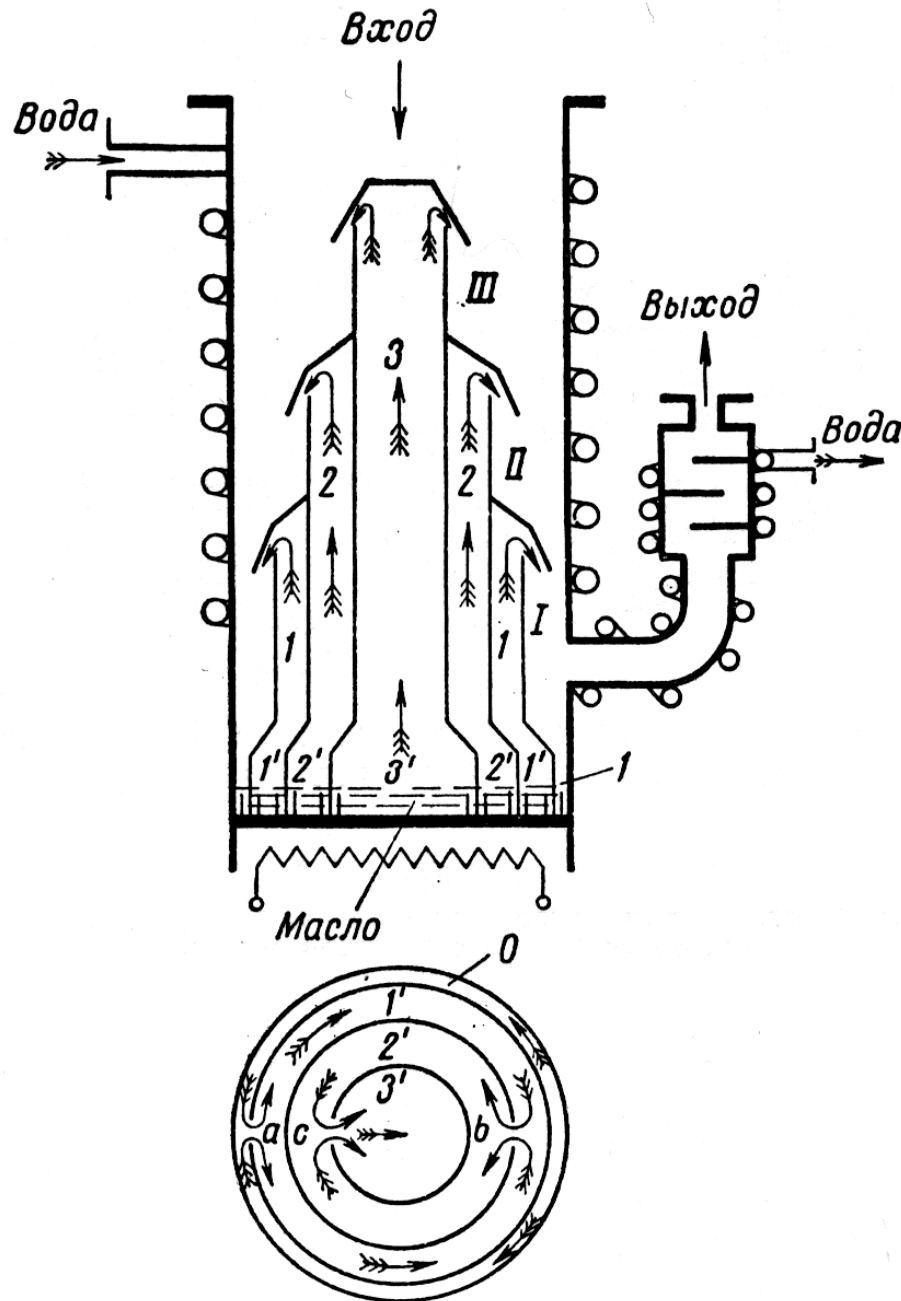
Масляный ротационный насос с золотниками в роторе.

Механический форвакуумный масляный насос. $10^3 \div 10^{-3}$ torr



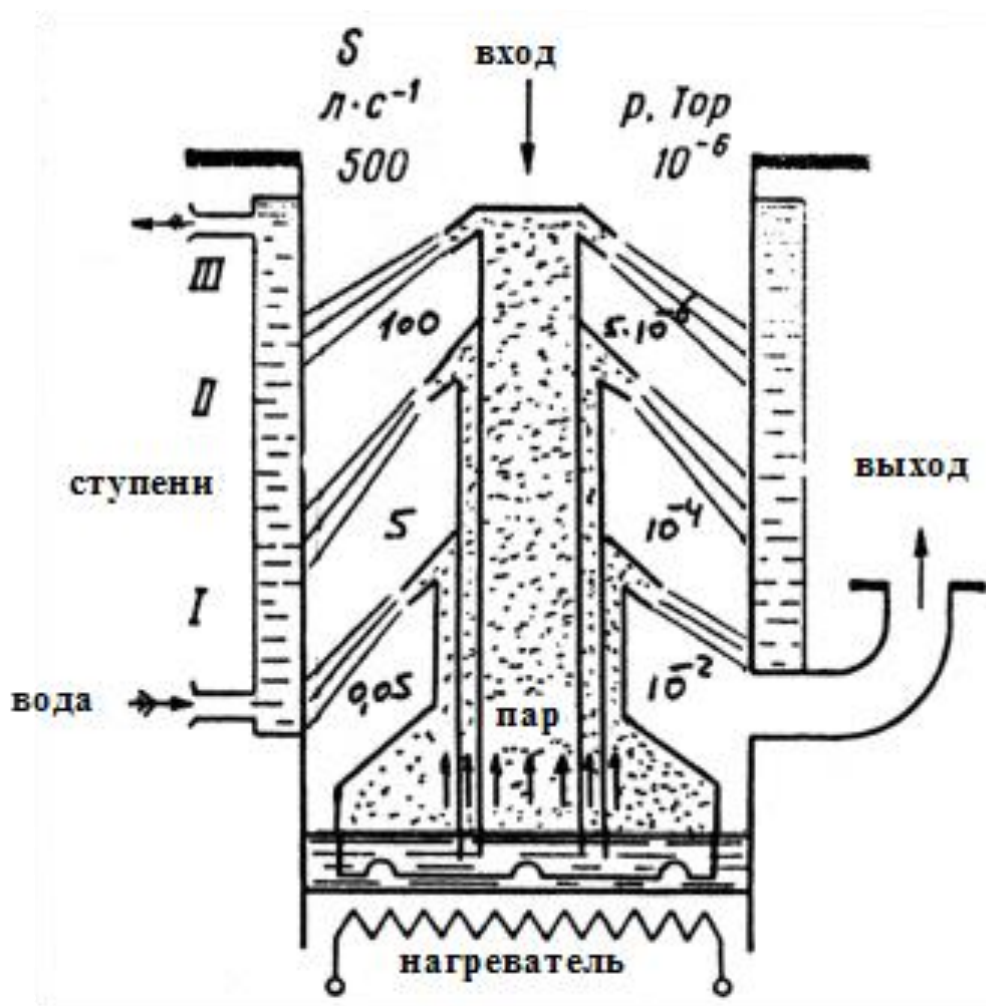
Ротационный масляный насос с золотником в статоре.

Диффузионный пароструйный насос. $10^{-1} \div 10^{-6}$ torr



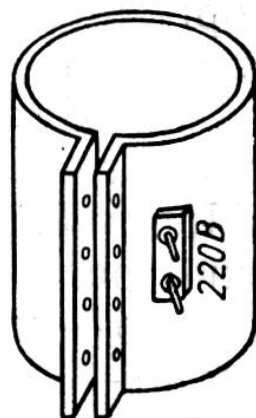
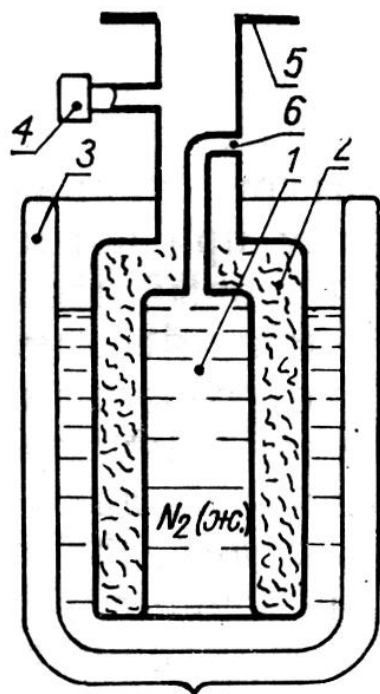
- Выход подсоединяется к форвакуумному насосу
- Требуется непрерывного водяного или воздушного охлаждения
- Снизу греется электрическим нагревателем
- Струи паров масла имеют сверхзвуковую скорость

Диффузионный пароструйный насос.



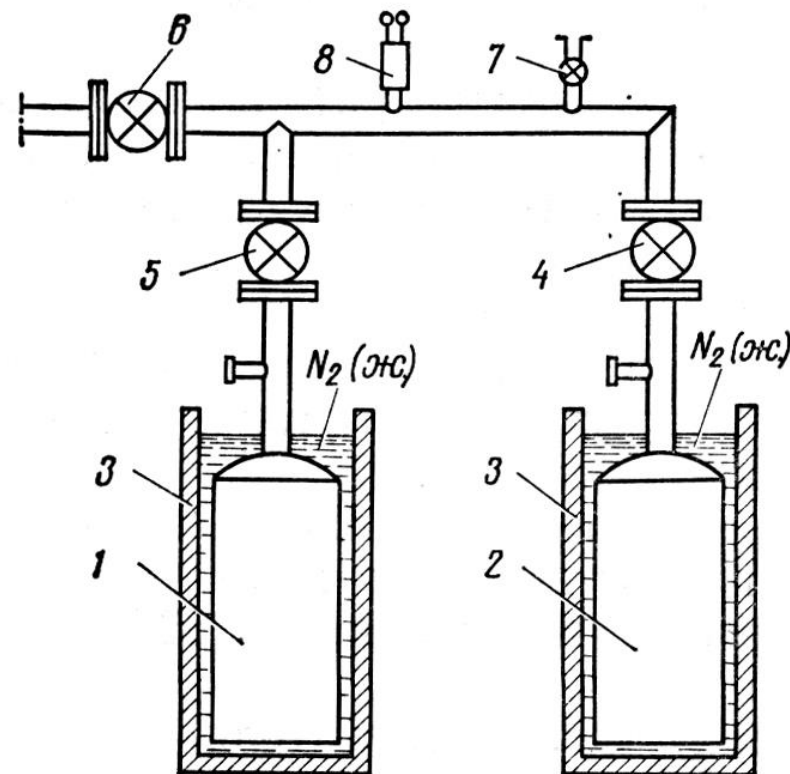
Распределение давлений по ступеням откачки

Цеолитовый форвакуумный безмаслянный насос. $10^3 \div 10^{-4}$ torr



1 – жидкий азот, 2 – цеолит, 3 – сосуд Дьюара, 4 – резиновая пробка, 5 – фланец, 6 – дренажный канал.

Справа – нагреватель для регенерации.



Батарея цеолитовых насосов.

1, 2 – насосы, 3 – пенопластовые стаканы, 4, 5, 6, 7 – вентили, 8 – манометр.

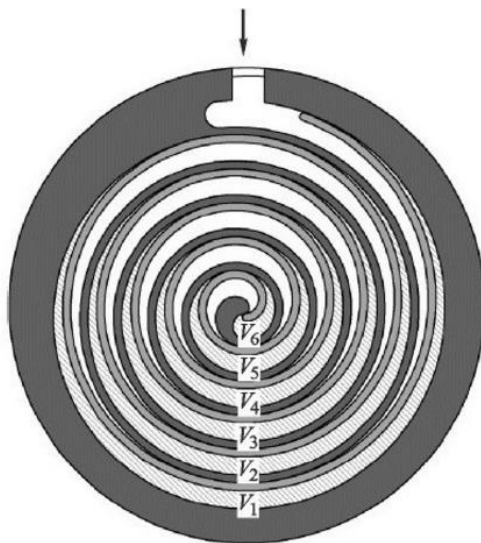
Безмасляный спиральный форвакуумный насос



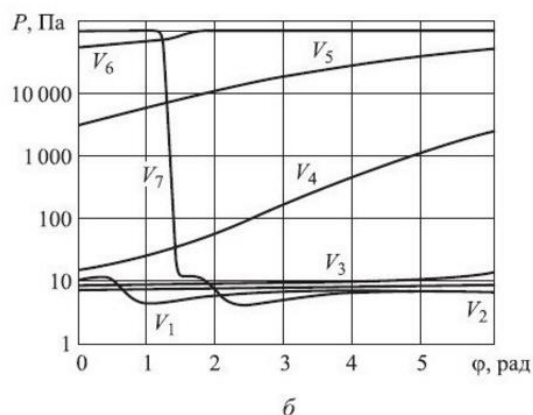
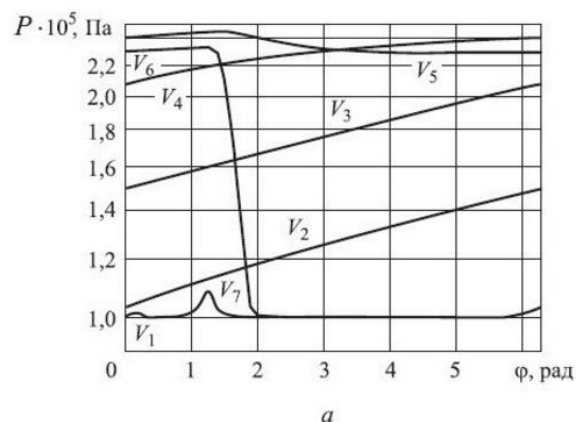
- Полностью (иногда почти) бесконтактные насосы, откачка в которых обеспечивается вращением роторов специальной формы, зазоры между которыми очень малы – до микрометров, поэтому уровень обратного потока газа также крайне мал
- Обеспечивают эффективную безмасляную откачку от атмосферы до 10^{-2} торр.
- Скорость откачки 500 -1000 л/сек
- Родственные бесконтактные насосы – когтевые, винтовые насосы, многоступенчатые насосы Рутса

Безмасляный спиральный форвакуумный насос

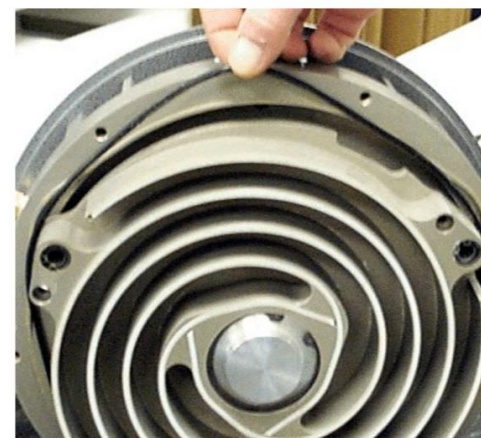
Давления в серповидных секциях насоса



Уплотнение из ПТФЭ

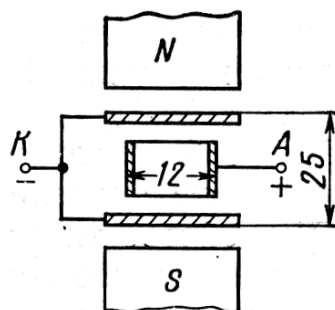
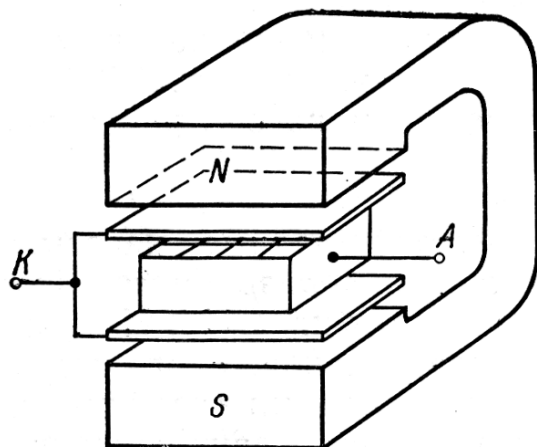


Зависимость давления в большей полости насоса в зависимости от положения подвижной орбитальной спирали. а - при начальном давлении 100000 Па, б - при давлении 10 Па.

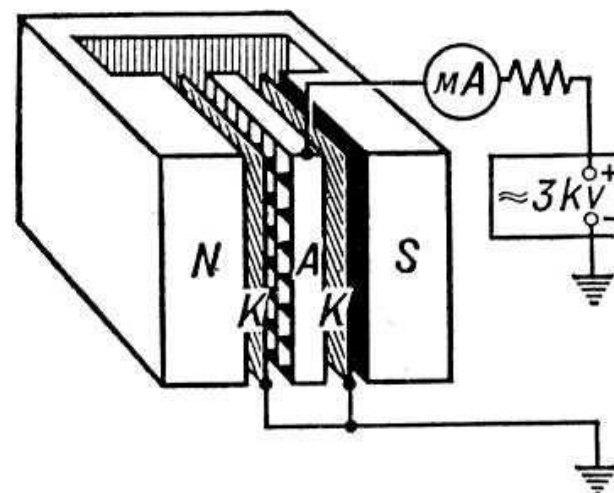


С трехзаходной спиралью

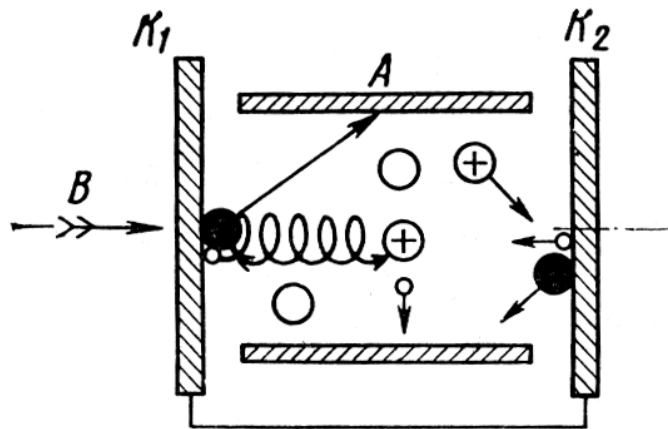
Магнитоэлектронный насос $10^{-3} \div 10^{-9}$ torr



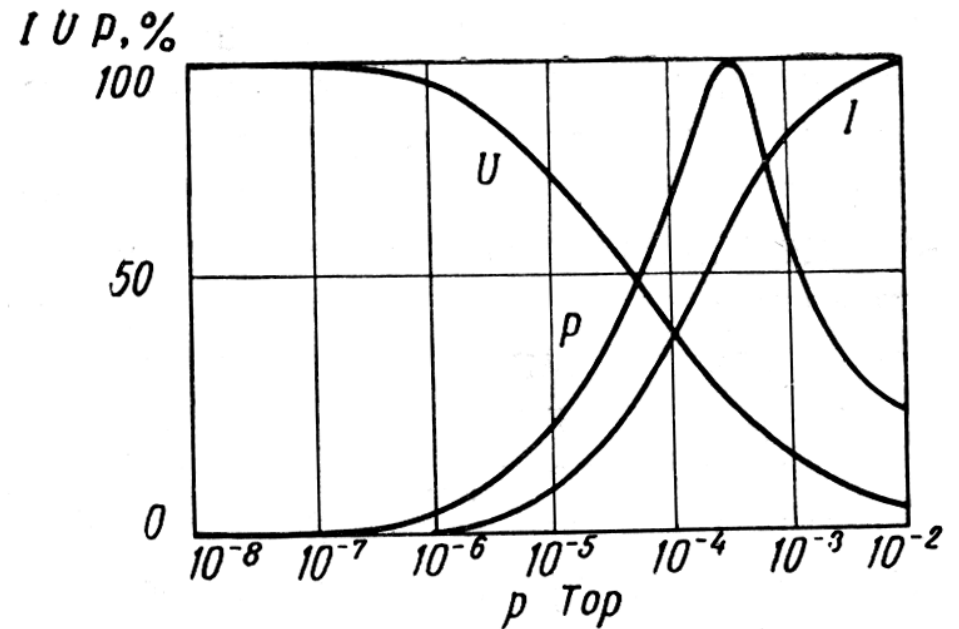
Магнитный электроразрядный насос.



Принцип действия МРН



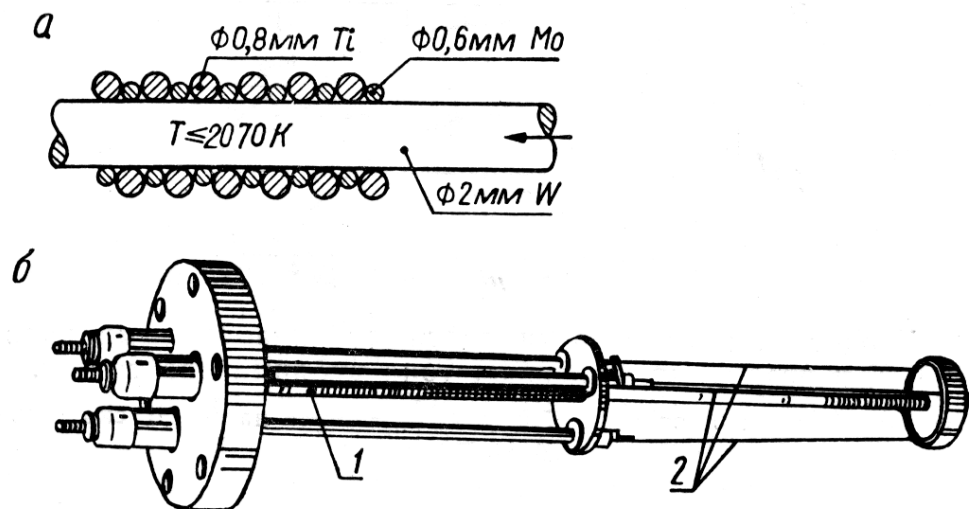
- ⊕ Ион
- Атом
(молекула) газа
- Электрон
- Атом титана



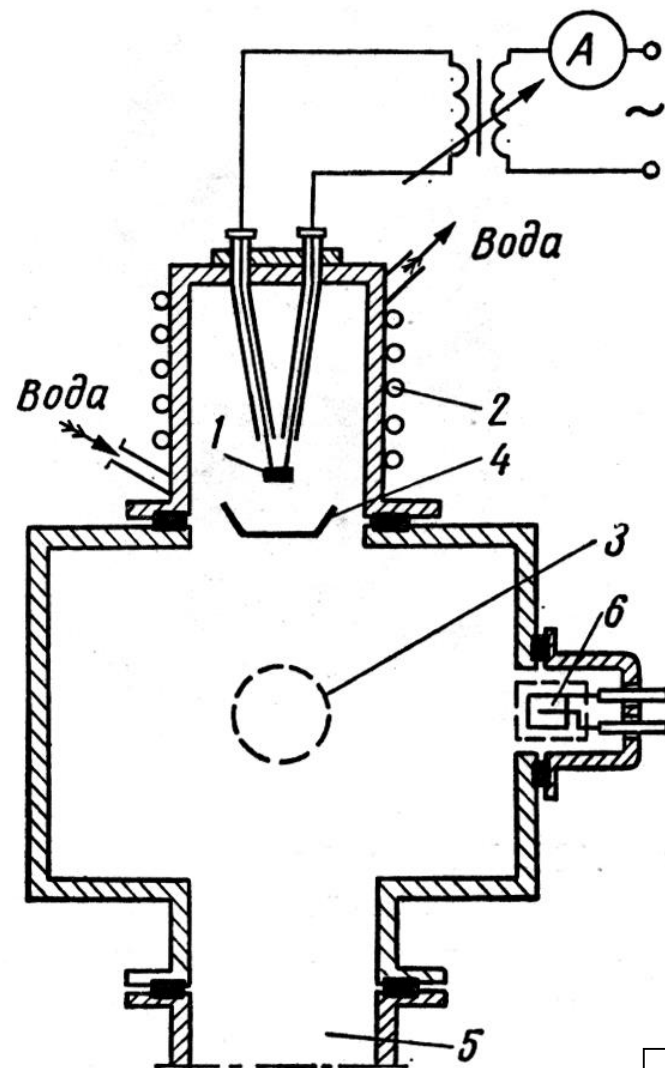
Электроразрядный диодный насос

Сублимационный насос

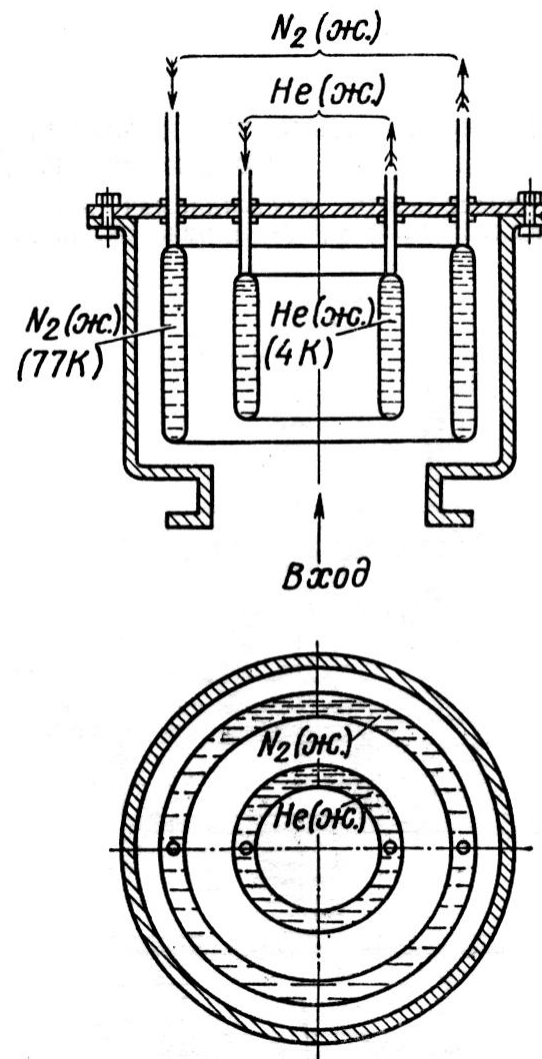
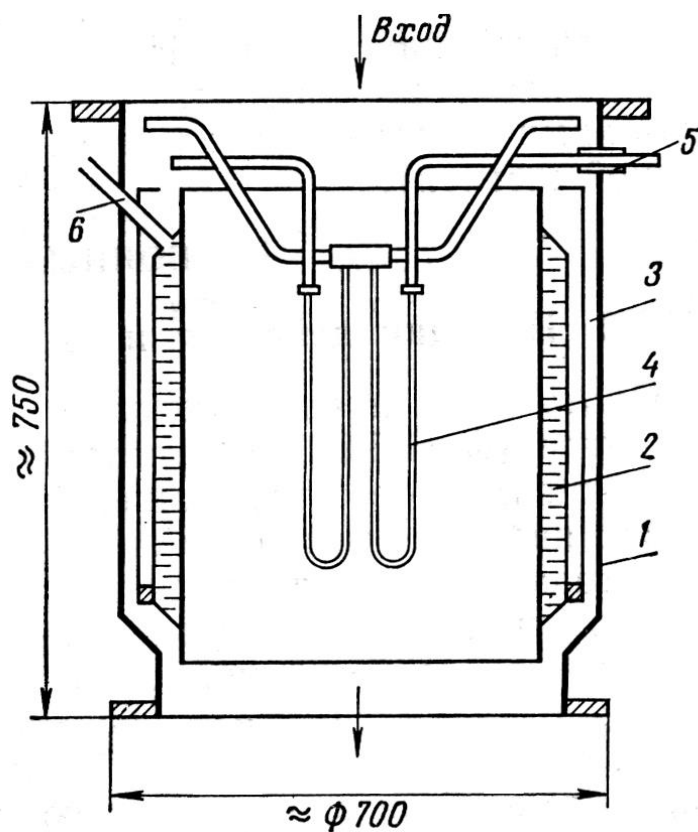
$10^{-8} \div 10^{-11}$ torr



Сублиматор.

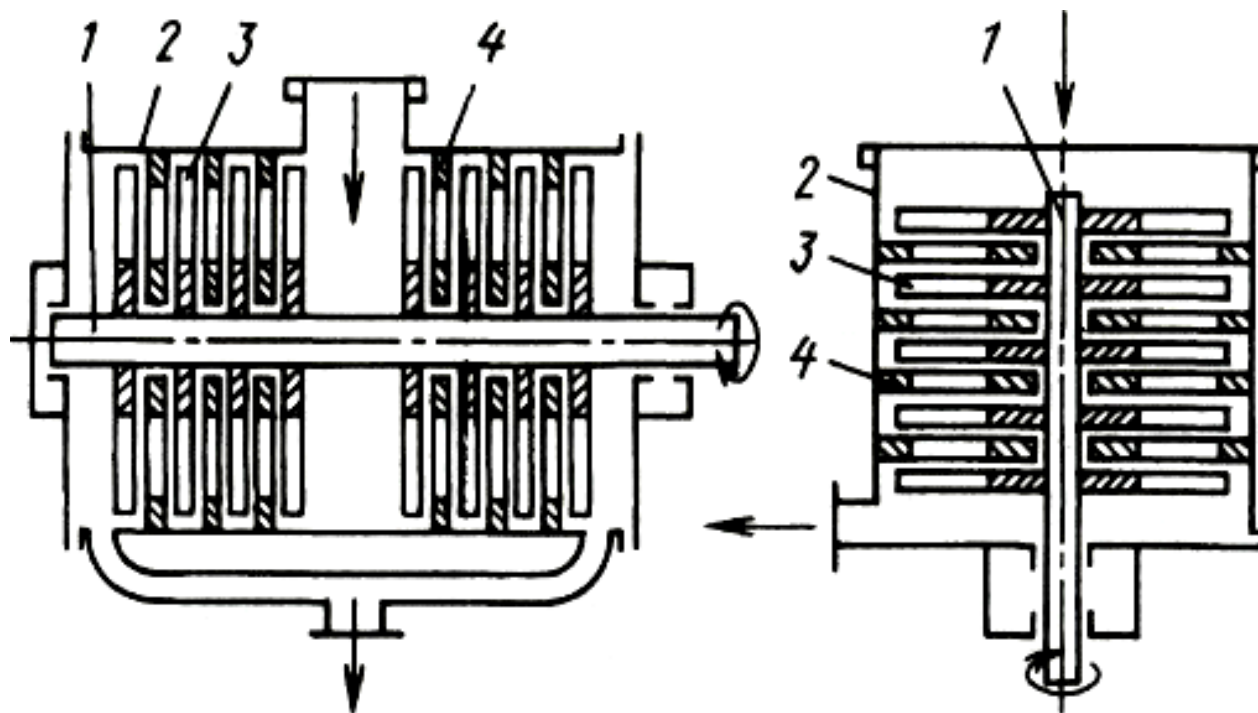


Криогенные насосы



Сублимационный криогенный насос $10^{-8} \div 10^{-13}$ torr

Турбомолекулярный насос $10^{-2} \div 10^{-8}$ torr

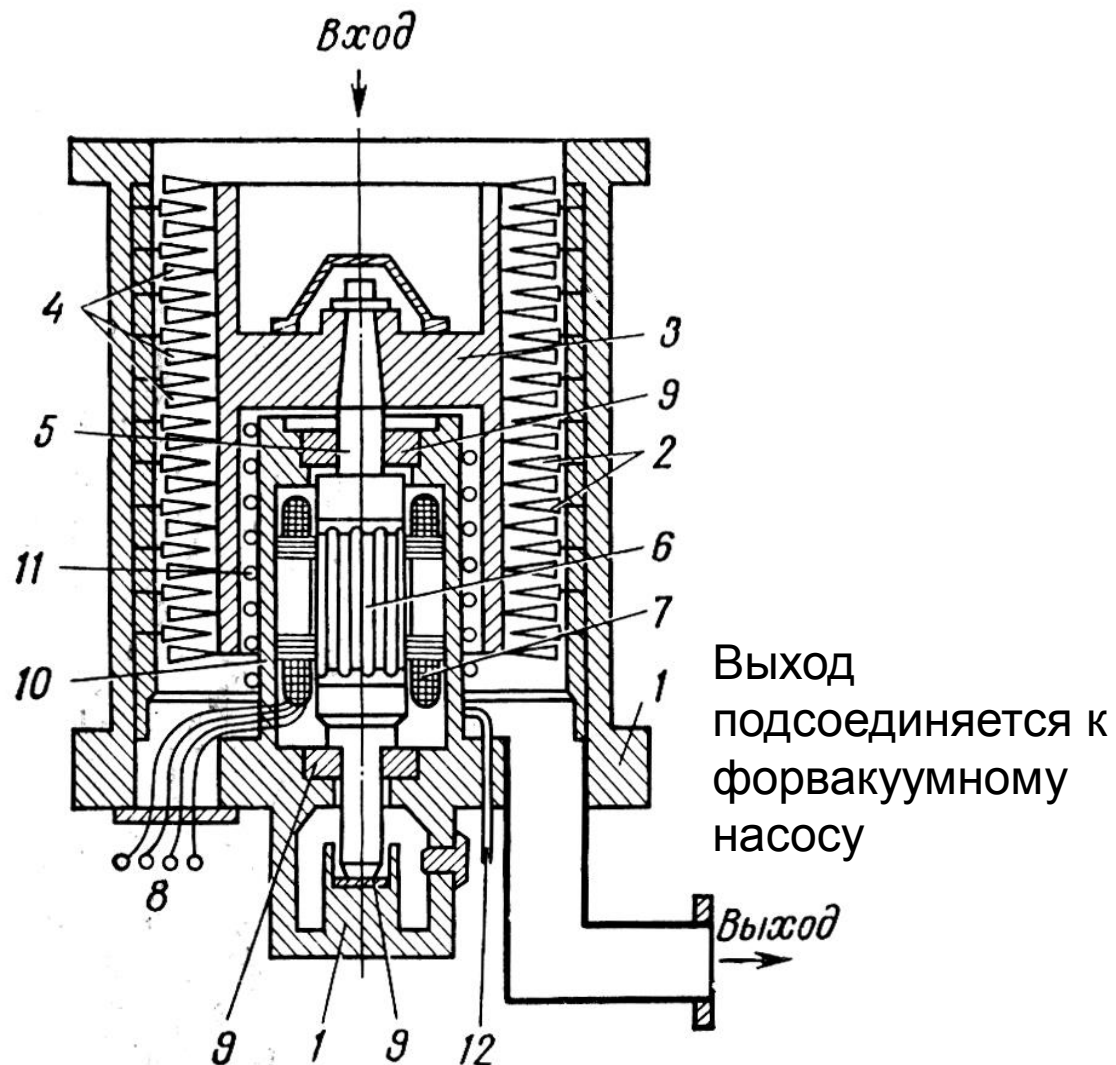


В корпус 2 закреплены неподвижные статорные диски 4.

Ротор 1, представляющий собой вал с рабочими дисками 3, вращается в корпусе со скоростью в десятки тысяч оборотов в минуту.

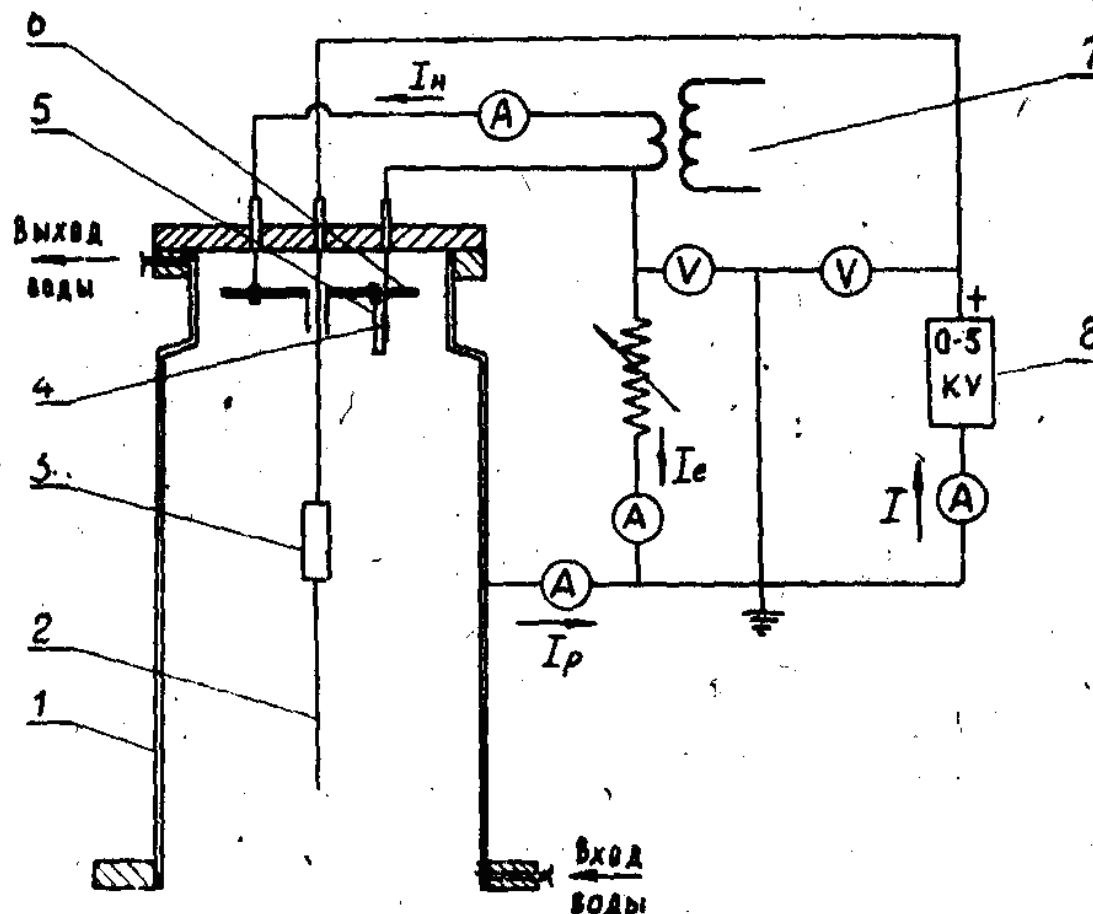
В рабочих дисках ротора предусмотрены косые радиальные пазы либо установлены под определенным углом лопатки. Статорные диски имеют конфигурацию, зеркально отражающую конфигурацию роторных.

Турбомолекулярный насос. $10^{-2} \div 10^{-8}$ torr



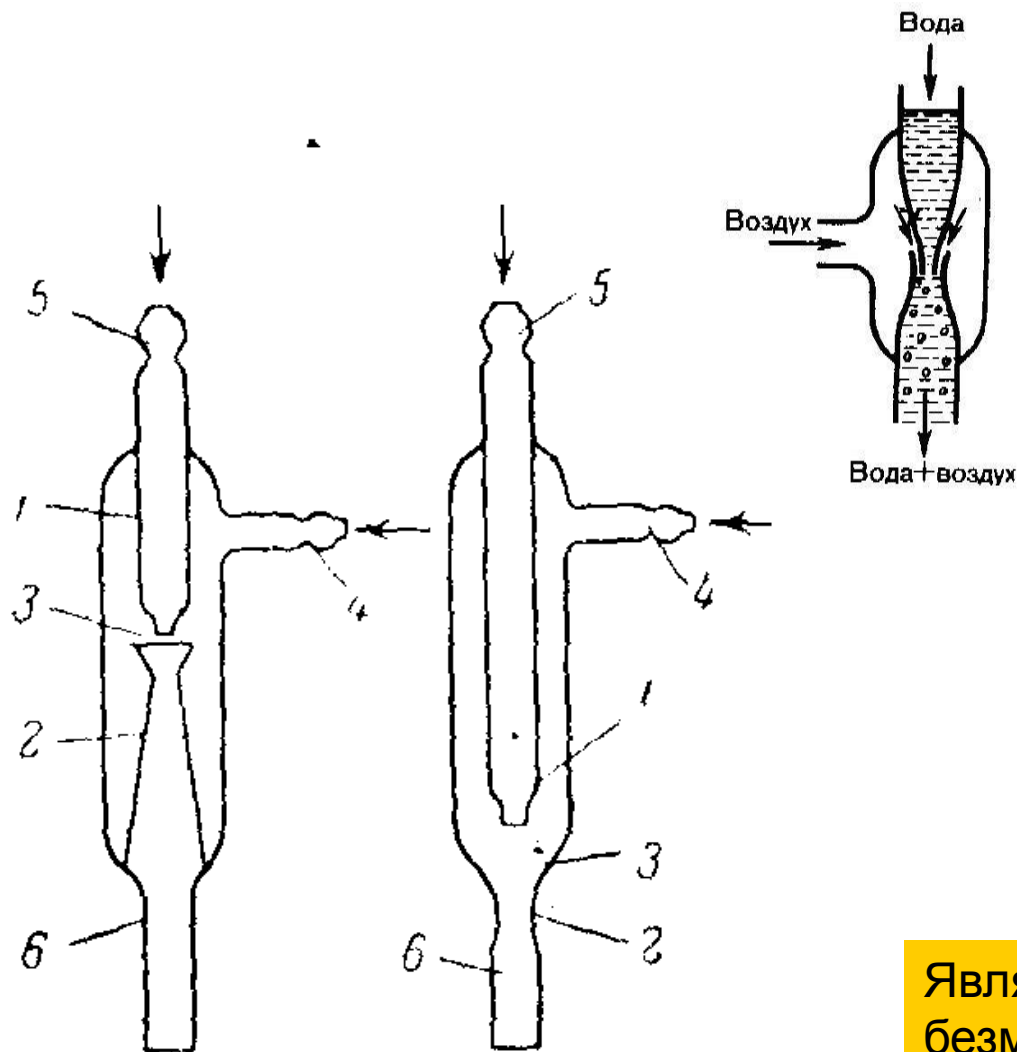
Предельное давление - 10^{-6} Па. Частота вращения 30-50 тыс.об./мин
Наибольшее рабочее давление 10^{-1} Па. 100 – 10000 л/с.

Сублимационно-ионизационный насос типа «Орбитрон» (насос ОГИН)



1 – корпус; 2 – анод; 3 – цилиндр из геттерного материала; 4 – инжектор; 5 – экран; 6 – отражательный электрод; 7 – нагревательный трансформатор; 8 – высоковольтный источник питания.

Водоструйный насос. $10^3 \div 20$ torr



- 1 – рабочее сопло,
- 2 – трубка Вентури,
- 3 – камера смешения,
- 4 – к откачиваемому объему,
- 5 – впуск воды,
- 6 – выпуск воды

Является
безмасляным насосом

Виды водоструйных насосов

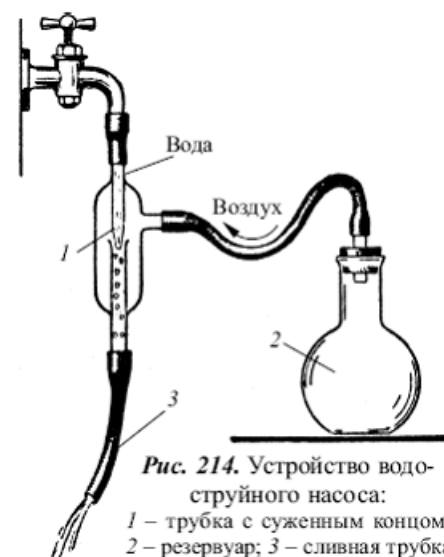
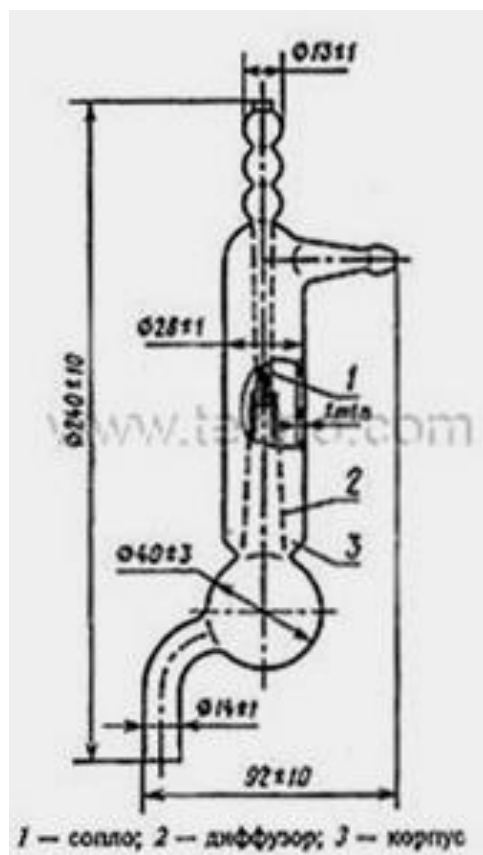
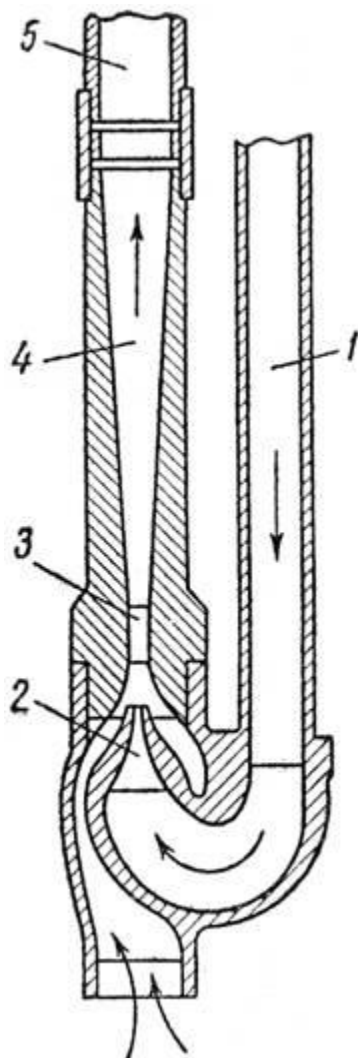


Рис. 214. Устройство водоструйного насоса:

1 — трубка с суженным концом;
2 — резервуар; 3 — сливная трубка

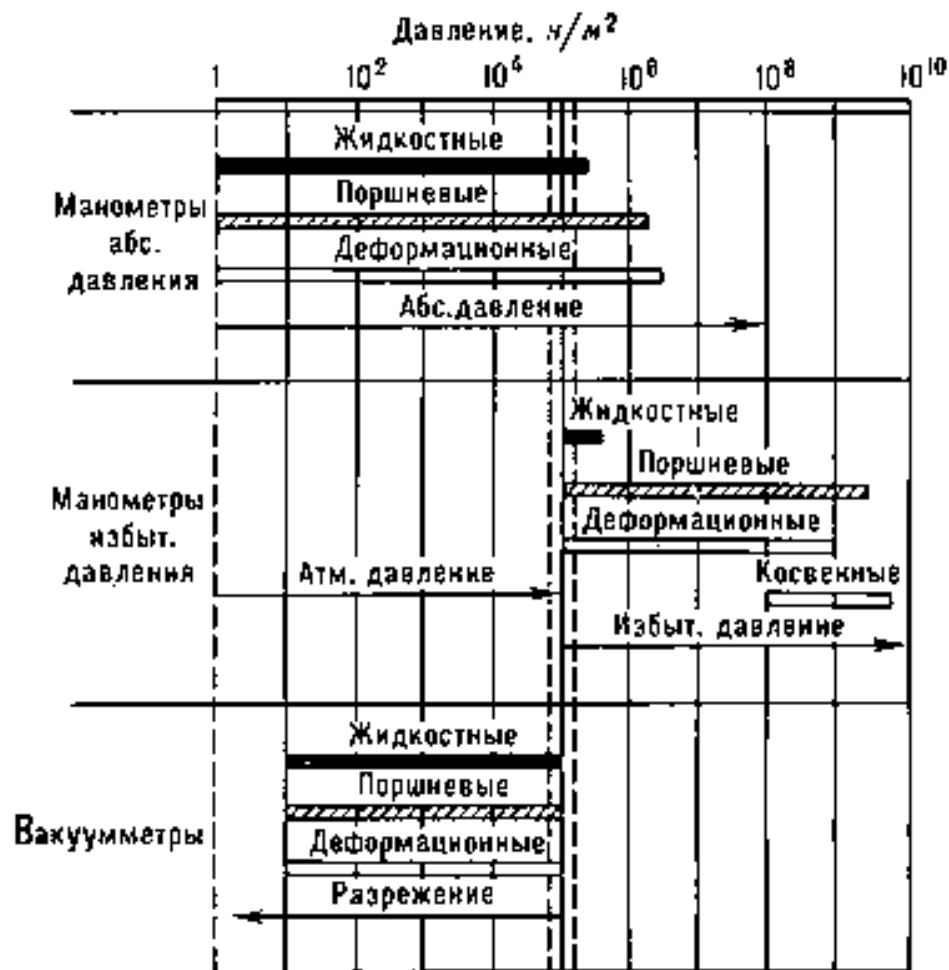
Датчики высоких давлений

- **Электромеханические преобразователи**
 - Реостатные преобразователи
 - Тензосопротивления
- **Электростатические преобразователи**
 - Емкостные преобразователи
 - Пьезодатчики (ЦТС, турмалин, кварц)
 - Электретные датчики (PVDF)
- **Электромагнитные преобразователи**
 - индуктивные (изменение индуктивности L при перемещении сердечника),
 - трансформаторные (изменение взаимной индукции M при изменении взаимного расположения катушек),
 - индукционные (возникновение ЭДС в контуре при его деформации),
 - магнитоупругие (изменение магнитной проницаемости μ ферромагнитного сердечника при его деформации - магнитострикция)
- **Манганиновые преобразователи**
чувствительность $S \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ на кбар
- **Метод «откола»** (стопка Рейнхарда)
- **Метод Р-и диаграмм**
 $R = \rho u$, где ρ - плотность материала, u - массовая скорость материала, s - скорость звука

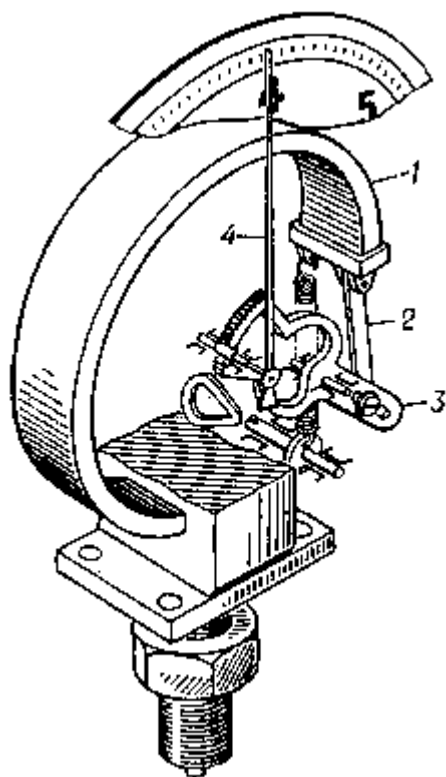
Датчики давления

- Манометры
 - жидкостные
 - деформационные (в том числе на тензодатчиках)
 - пружинные (трубчатые, мембранные, сифонные)
- Барометр
 - жидкостный (ртутный)
 - aneroid
- Трубка Пито - Прандтля

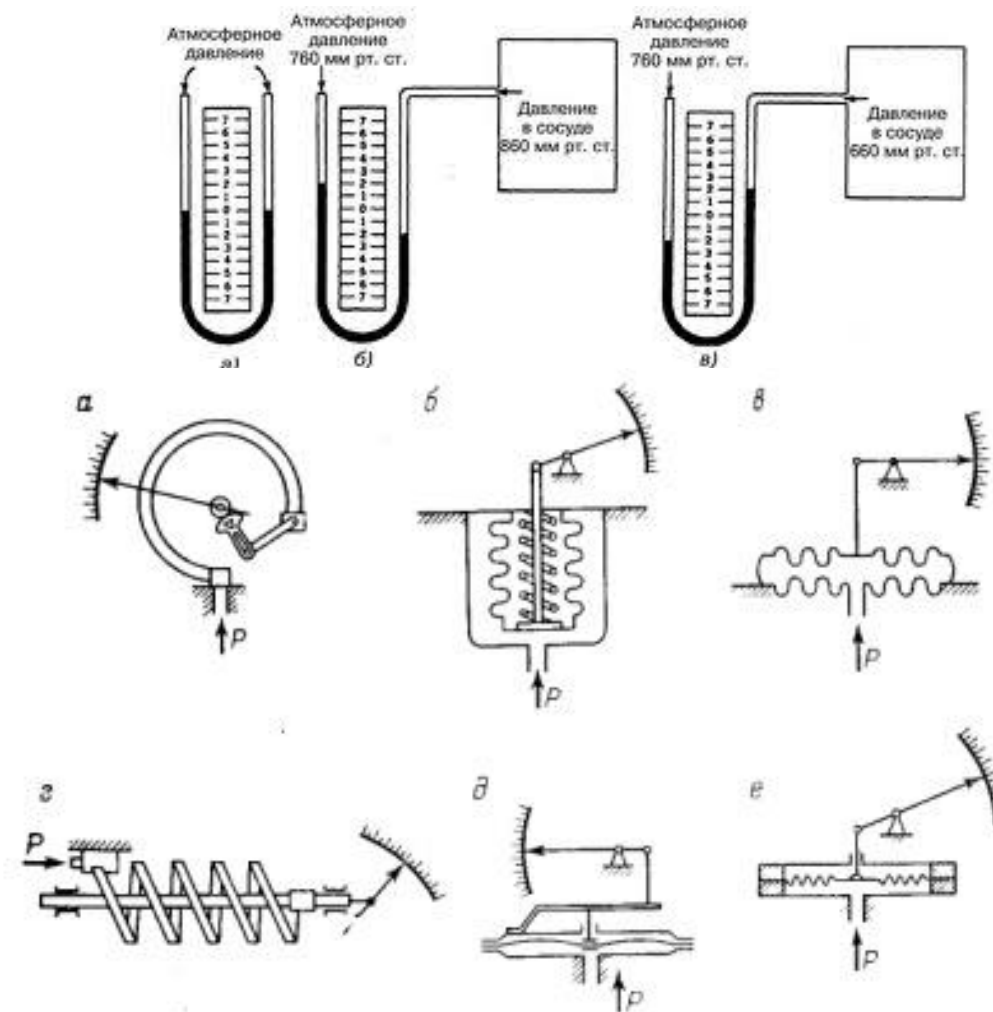
Рабочие диапазоны и шкалы промышленных манометров



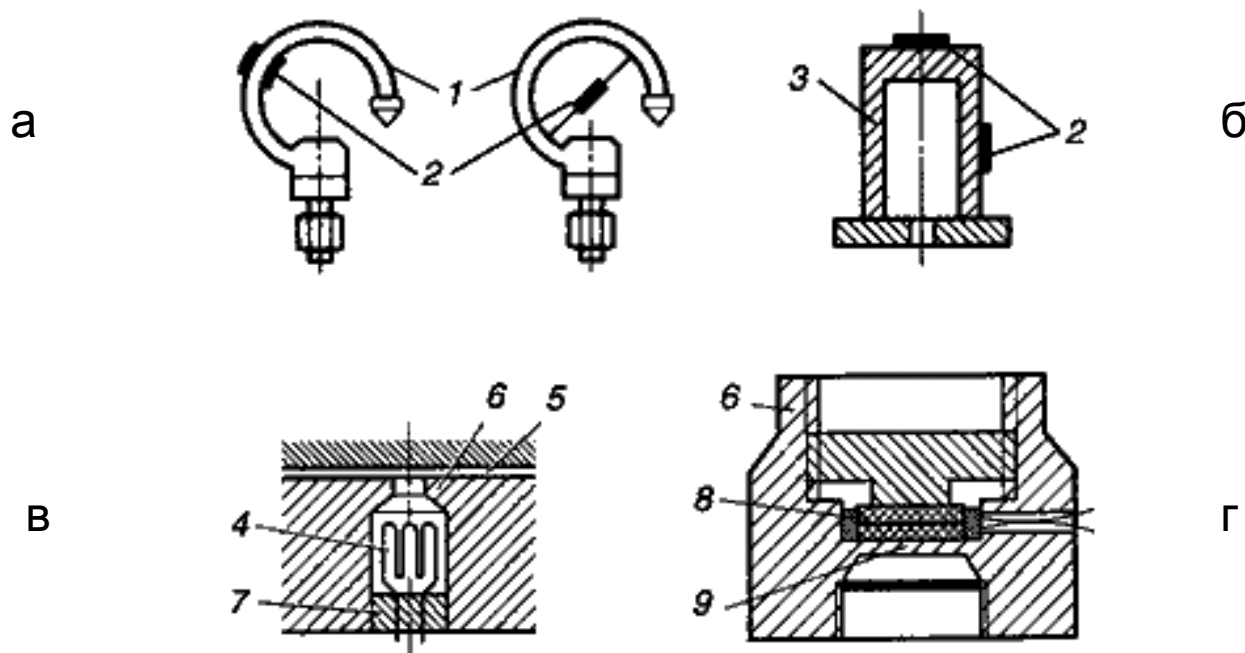
Трубчатый деформационный и жидкостный манометры



Трубчатый манометр : 1 — трубка;
2 — рычаг передаточного механизма; 3 — передаточный механизм;
4 — стрелка.



Электрические манометры



а - с трубкой Бурдона; б - тонкостенный цилиндрический датчик с наклеенными тензодатчиками; в - с манганиновой проволокой; г - пьезоэлектрический;

1 - трубка Бурдона; 2 - тензодатчики;

3 - тонкостенный стакан; 4 - манганиновый датчик; 5 - узкая щель;

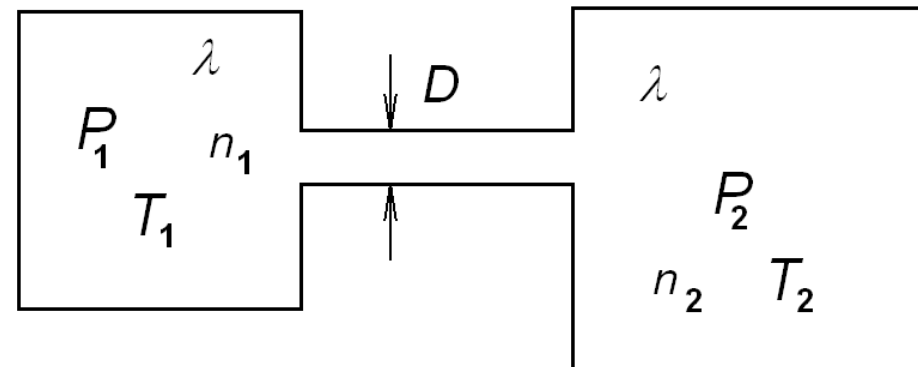
6 - корпус; 7 - заливка эпоксидной смолой;

8 - пьезоэлектрический датчик; 9 - перегородка

Проблемы получения высокого вакуума

- Течение газа по трубам при $D \ll \lambda$
- Эффект Кнудсена
- Адсорбция газа на стенках сосуда
- Абсорбция газа в объёме (титан, тантал)
- Коэффициент аккомодации

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}; \quad \frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$



Прогрев всей системы выше 300°C для десорбции газов с поверхности внутренних стенок объема

Использование материалов с низким давлением собственных паров

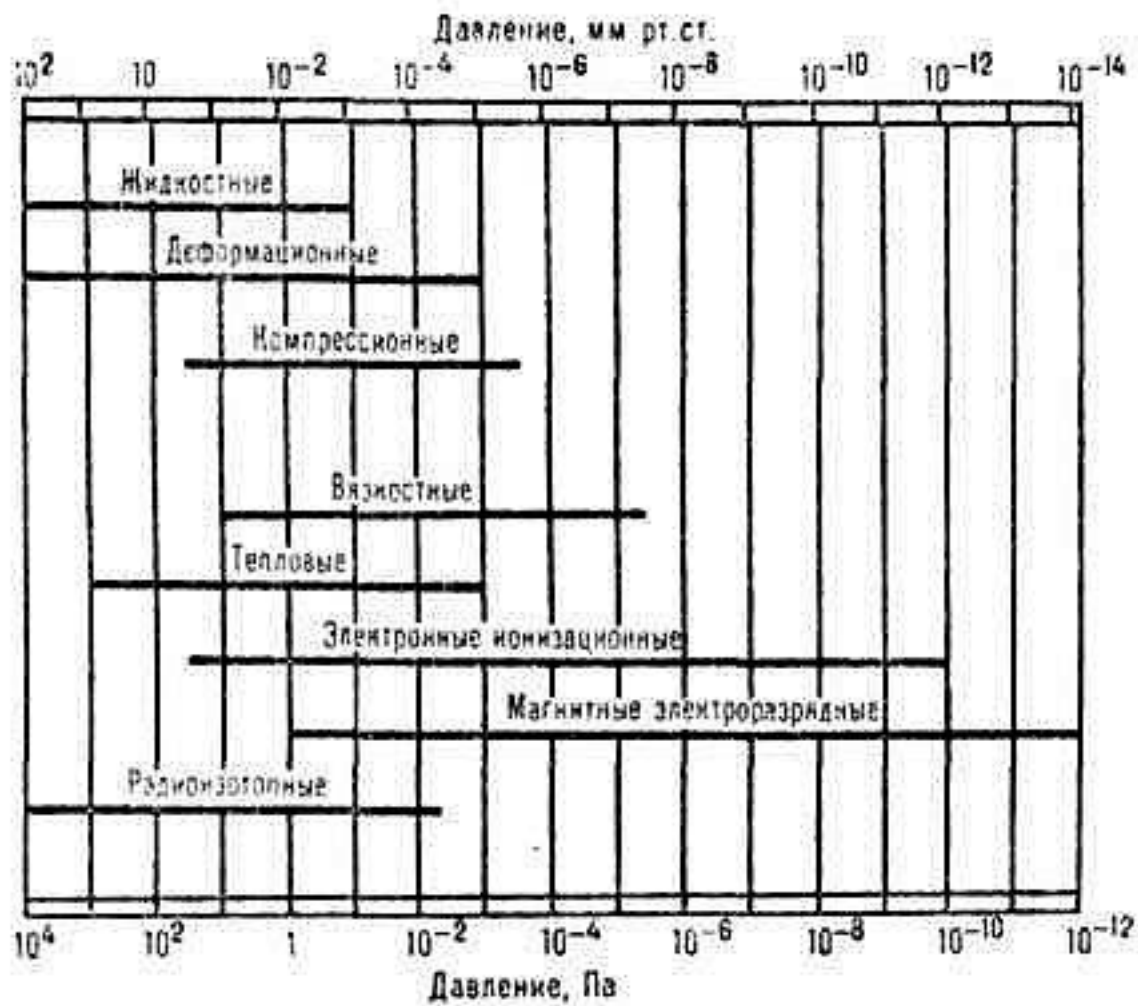
Электровакuumные материалы

- Аустенитная (немагнитная) нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
- Титан (спектрально чистый)
- Вольфрам
- Тантал
- Молибден
- Медь отожженная бескислородная М0
- Никель
- SiO_2 - Кварц
- Al_2O_3 - Алундовая керамика, Сапфир, Лейкосапфир, Рубин
- Слюда
- Стекло
- Графит
- Нитрид бора

Вакуумметры

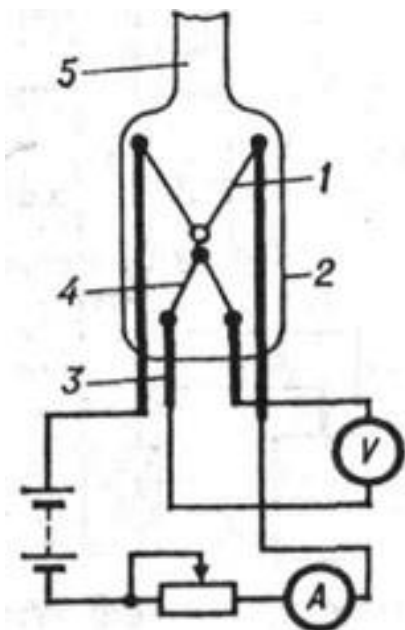
- Термопарный $10^0 \div 10^{-3}$ torr
- Ионизационный $10^{-3} \div 10^{-7}$ torr
- Магнитная Пеннинговская ячейка $10^{-4} \div 10^{-11}$ torr
- Масс-спектрометр $10^{-4} \div 10^{-13}$ torr

Диапазон измерения давлений различными вакуумметрами

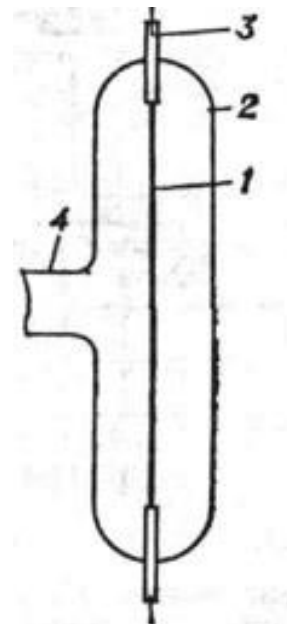


Манометры для форвакуума

А



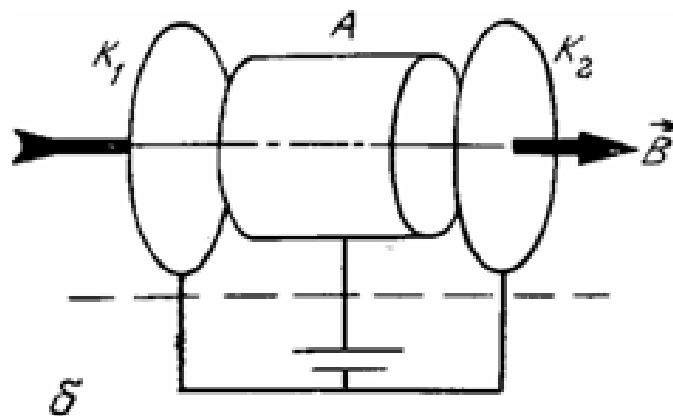
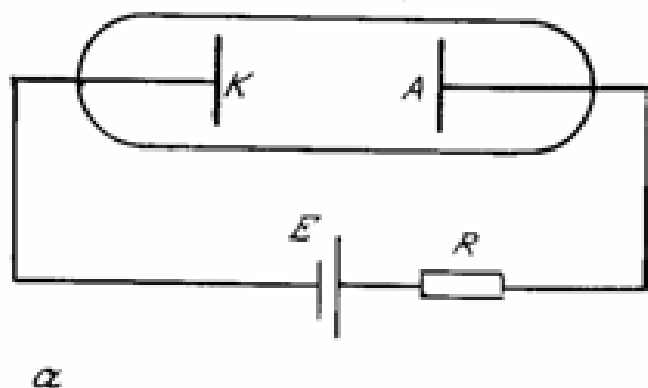
Б



А. Схема термопарного вакуумметра с измерением температуры нити с помощью термопары: 1 - нагреватель; 2 - вакуумный баллон; 3 - электрический ввод; 4 - термопара; 5 - соединительная трубка. Нить – тепловой мостик между нагревателем 1 и термопарой 4. Чем выше вакуум, тем меньше тепла отводится от нити, тем выше напряжение на термопаре

Б. Схема теплового вакуумметра с измерением температуры нити термометром сопротивления: 1 - нить; 2 - вакуумный баллон; 3 - электрический ввод; 4 - соединительная трубка

Ионизационный вакуумметр с холодным катодом



а – разрядная трубка; б – датчик Пеннинга.

Ионизационные высоковакуумные манометры

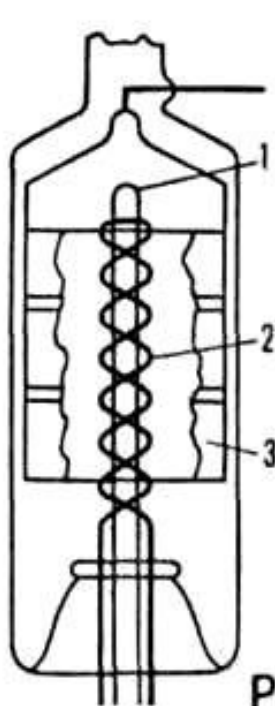


Рис.5

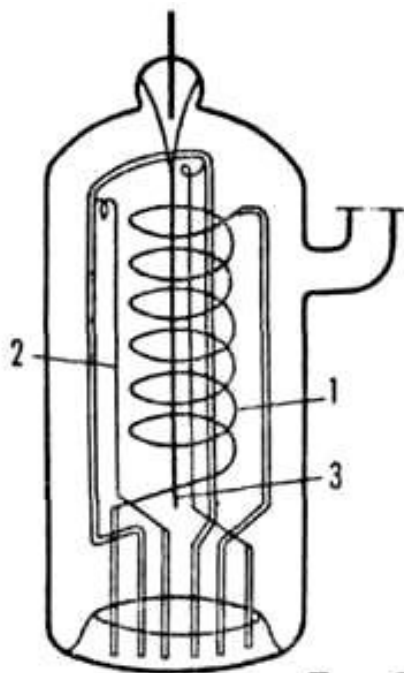


Рис.6

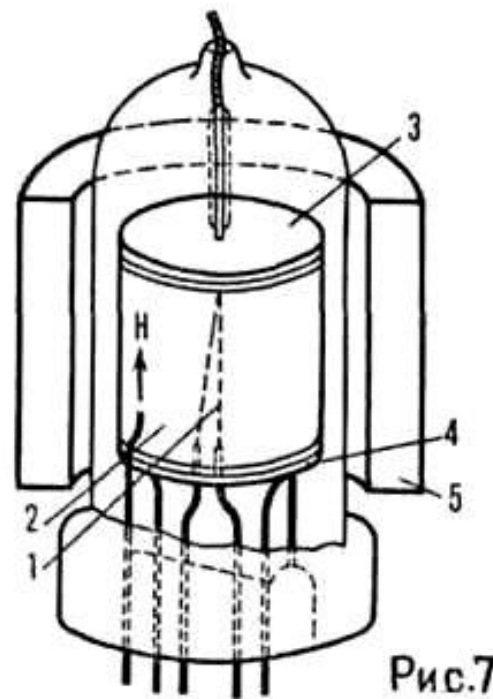


Рис.7

Рис. 5. Ионизационный вакуумметр: 1 -катод; 2-анод; 3 - коллектор.

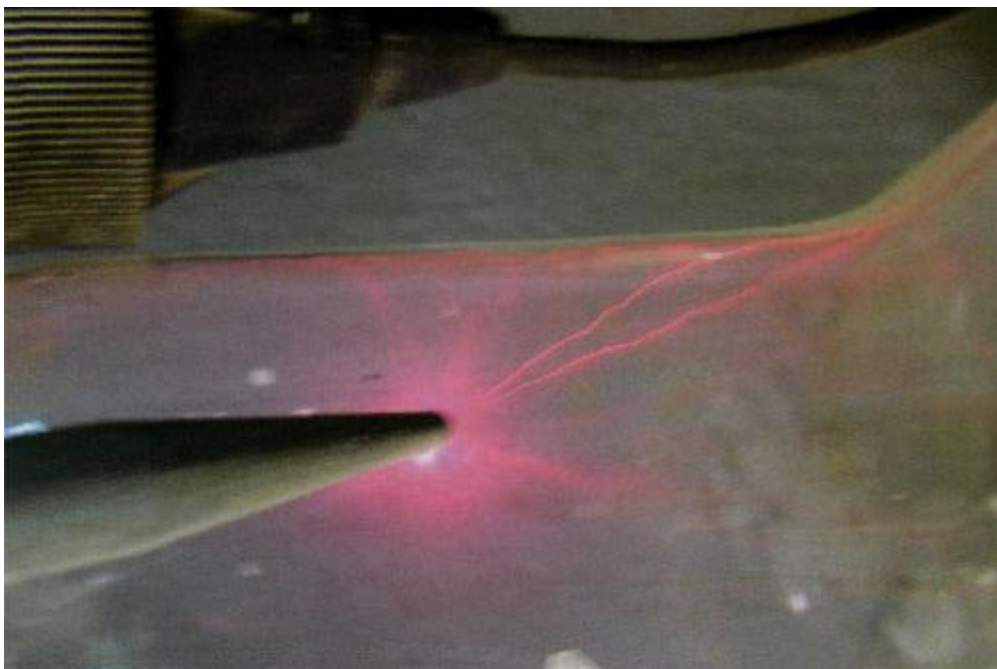
Рис. 6. Лампа Байярда-Альперта: 1-анод; 2-катод; 3-коллектор.

Рис. 7. Вакуумметр Лафферти: 1 -катод; 2-анод; 3-коллектор; 4-экран; 5-магнит.

Поиск течей. Течеискатели.

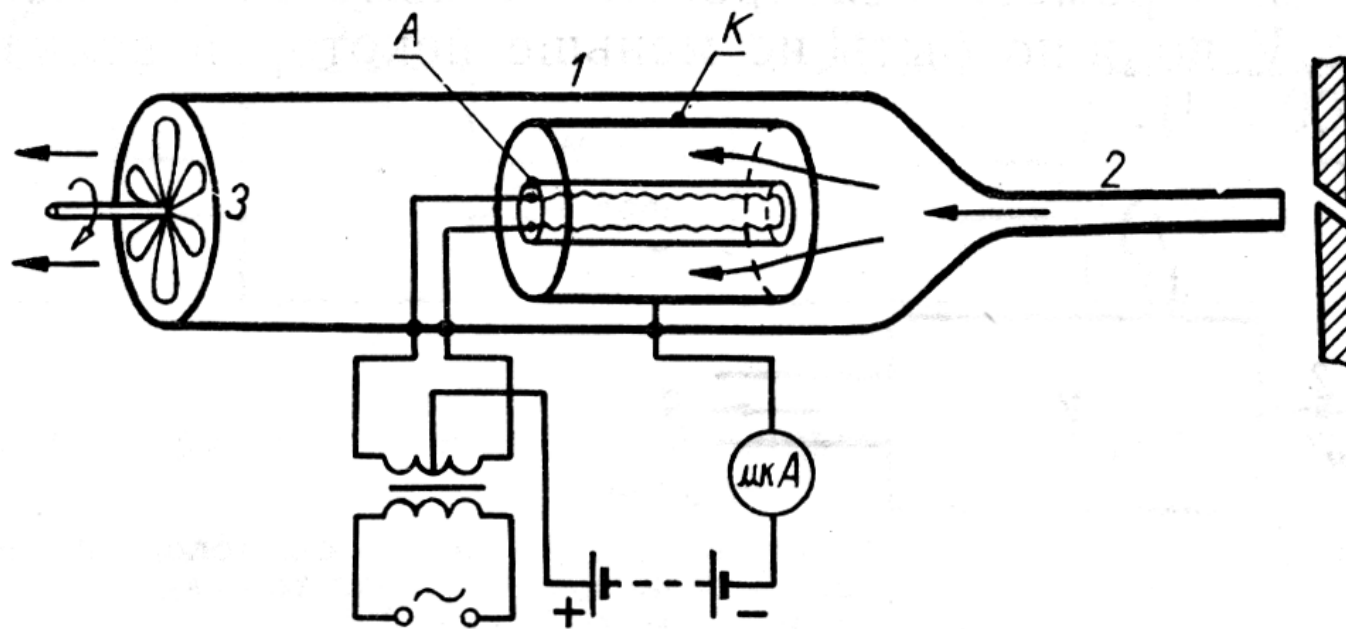
- Мыльный раствор
- Акустический датчик
- Галогенный течеискатель
- Трансформатор Тесла – стеклянные системы (искровой течеискатель)
- Ацетон – безмасляный вакуум
- Гелиевый течеискатель с масс-спектрометром

Течеискатель искровой для стеклянных объемов



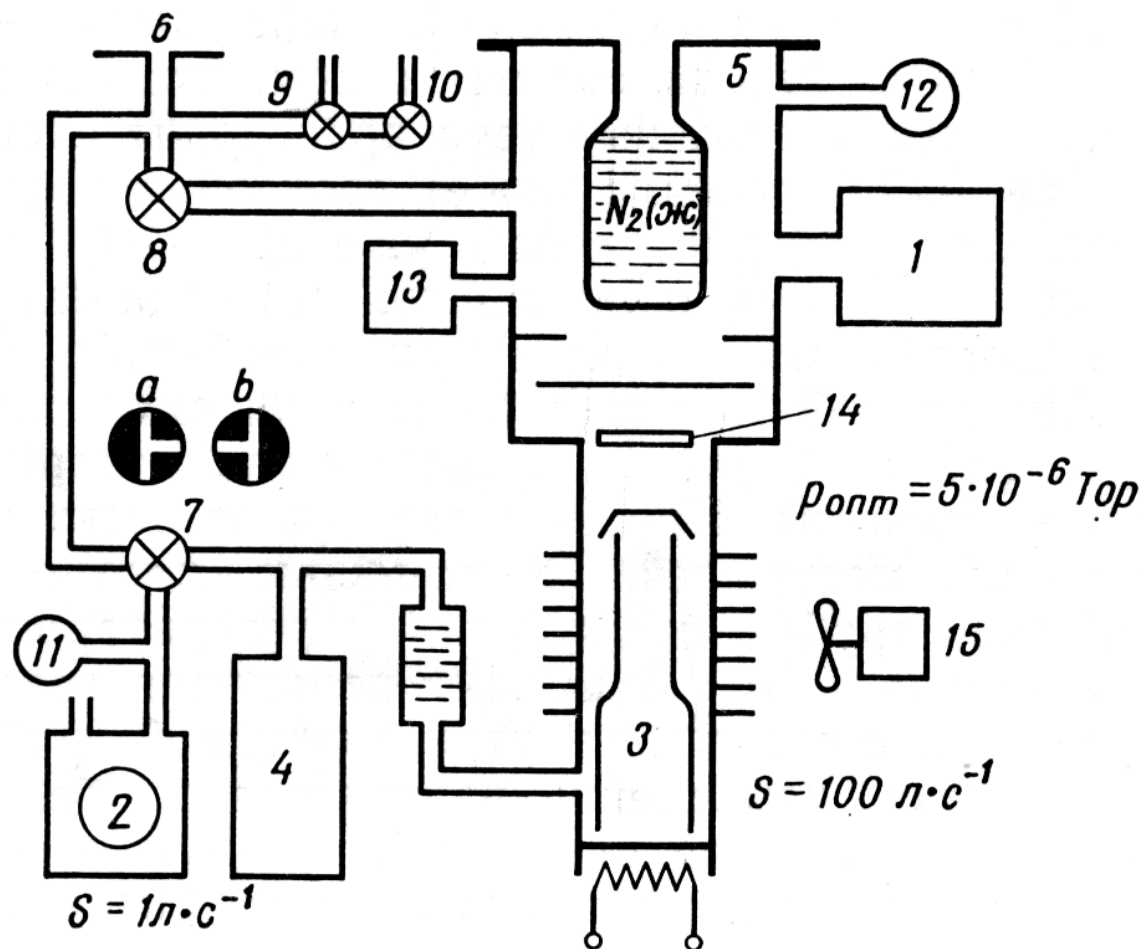
- Только для форвакуумных давлений
- Только для стеклянных и кварцевых объемов
- Портативный трансформатор Тесла
- При неаккуратном пользовании искрой течеискателя можно вызвать пробой стекла на исправном участке системы, а также повредить электронные узлы (датчик вакуумметра и сам вакуумметр)

Галогенный течеискатель



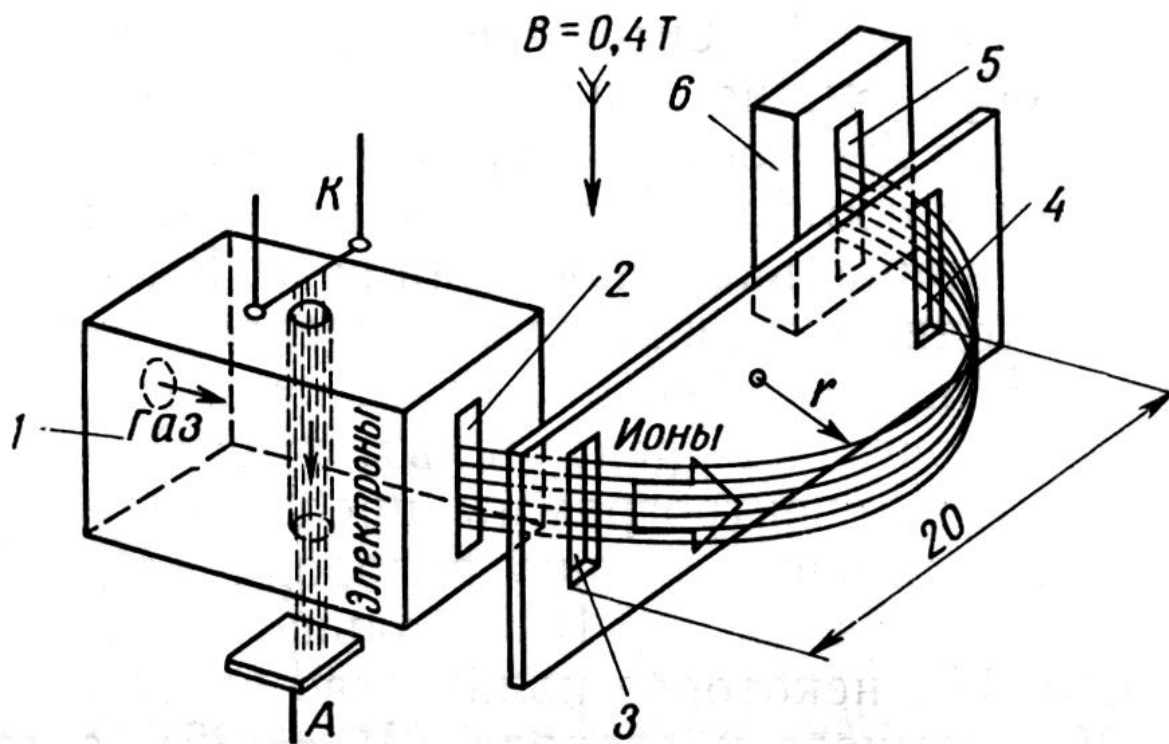
Галоидный детектор течей.

Схема гелиевого течеискателя



1 – масс-спектрометр, настроенный на He ; 2 – форвакуумный масляный насос; 3 – диффузионный (пароструйный) насос; 4 – форбаллон; 5 – ловушка с жидким азотом; 6 – исследуемая вакуумная система с течью; 7, 8, 9, 10 – вакуумные вентили; 11, 12 – термопарные манометры; 13 – ионизационный манометр; 14 – экран; 15 – вентилятор

Масс-спектрометрический датчик атомов гелия



1 – ионизационная ячейка; 2, 3, 4, 5 – коллиматоры (щели); 6 – детектор ионов

Спасибо за внимание!

Вопросы есть?

