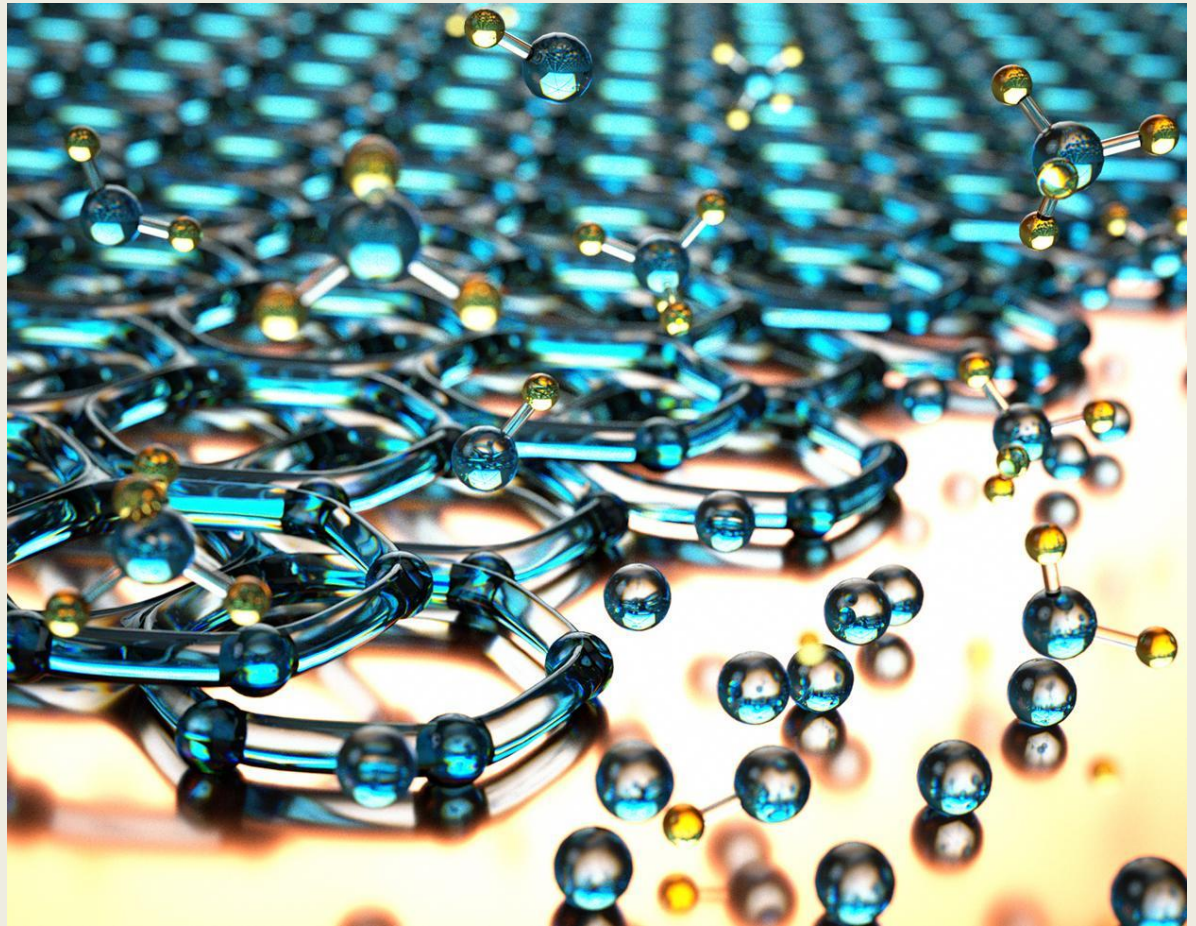


# **Основные методы получения наноструктурных материалов**

# Общее определение

Нanomатериалы (НМ) – продукты нанотехнологий, важнейшие функциональные свойства которых определяются наноразмером их структуры



# Методы получения объемных НМ

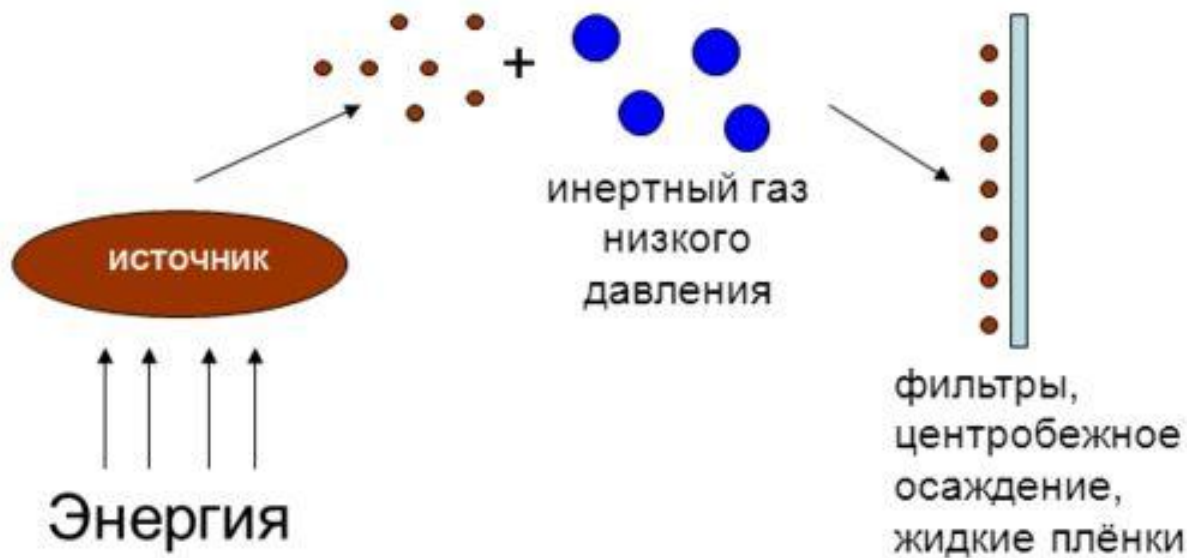
<b>Метод</b>	<b>Основные физические процессы</b>	<b>Получаемые материалы</b>
<b>Порошковая металлургия</b>	<b>Прессование и спекание; спекание под давлением</b>	<b>Металлические, керамика, керметы, композиционные,</b>
<b>Кристаллизация аморфных сплавов</b>	<b>Кристаллизация аморфных сплавов; консолидация аморфных порошков с последующей кристаллизацией</b>	<b>металлические</b>

<b>Метод</b>	<b>Основные физические процессы</b>	<b>Получаемые материалы</b>
<b>Интенсивная пластическая деформация (ИПД)</b>	<b>РКУ; деформация кручением при высоких давлениях; всесторонняя ковка</b>	<b>Металлические , композиционные</b>
<b>Формирование высокопористых структур</b>	<b>Формование, консолидирование</b>	<b>мезопористые молекулярные сита, пористая керамика</b>
<b>Формирование слоистых НМ</b>	<b>Осаждение из газовой фазы, электроосаждение прокатка</b>	<b>Слоистые НМ, наноламинаты</b>

# Методы получения НП

- **Физические**
- **Химические**
- **Физико-химические**

# Газофазный синтез

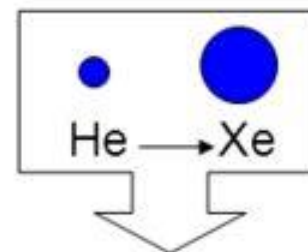
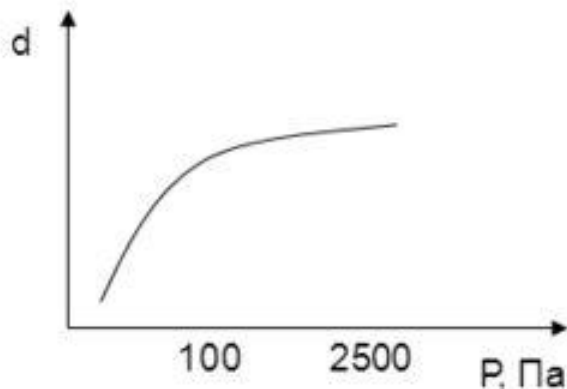


**Источник:**  
массивный  
оксид

**Источник:**  
металлы +  
газ-реагент

**Энергия:**  
электронный  
пучок

**Энергия:**  
лазерный  
импульс



увеличение размера  
частиц в несколько  
раз

сферические  $< d=20$  нм  $<$  ограниченные

# Механическое измельчение порошков

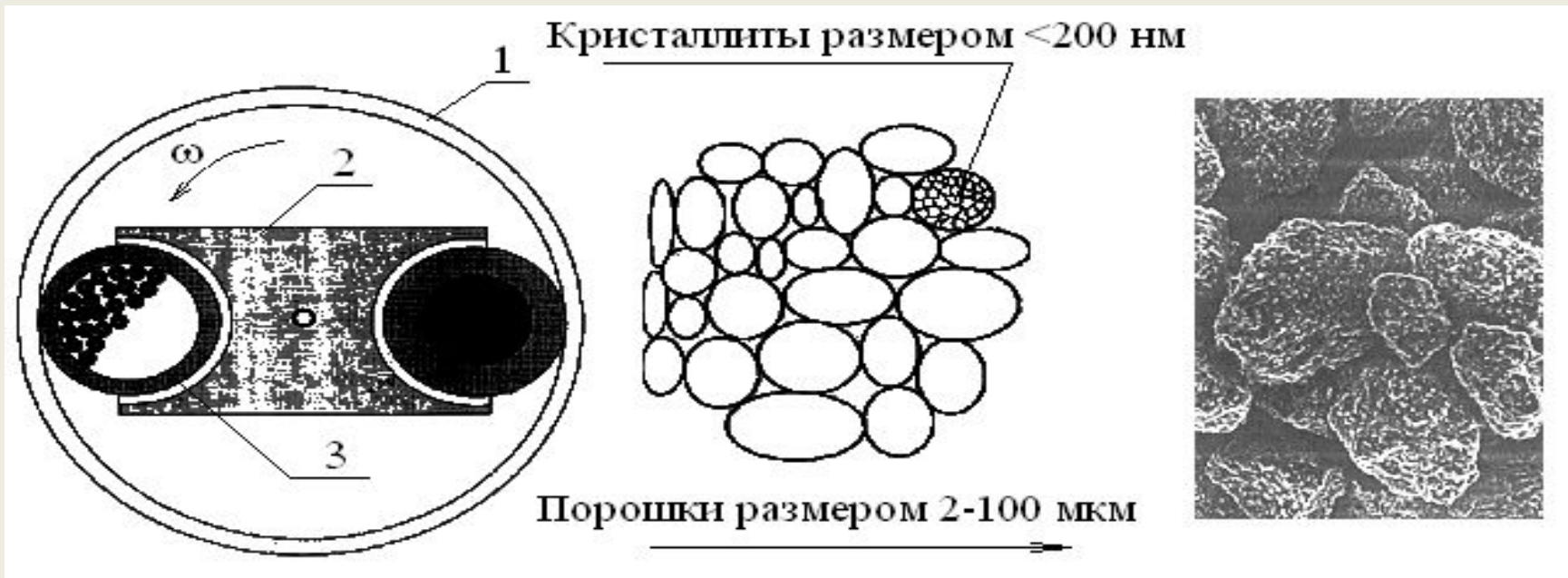
Для размола и механохимического синтеза применяют планетарные, шаровые и вибрационные мельницы.

$M_{\text{ш}}:M_{\text{п}} = 5:1 - 40:1$ .

$\tau_{\text{пом}} \sim 10 \text{ ч.}$

Дальнейшее воздействие не приводит к измельчению структуры. Минимально возможный размер зерна:

$$d_{\text{кр}} = 3Gb/(1 - \nu)H$$



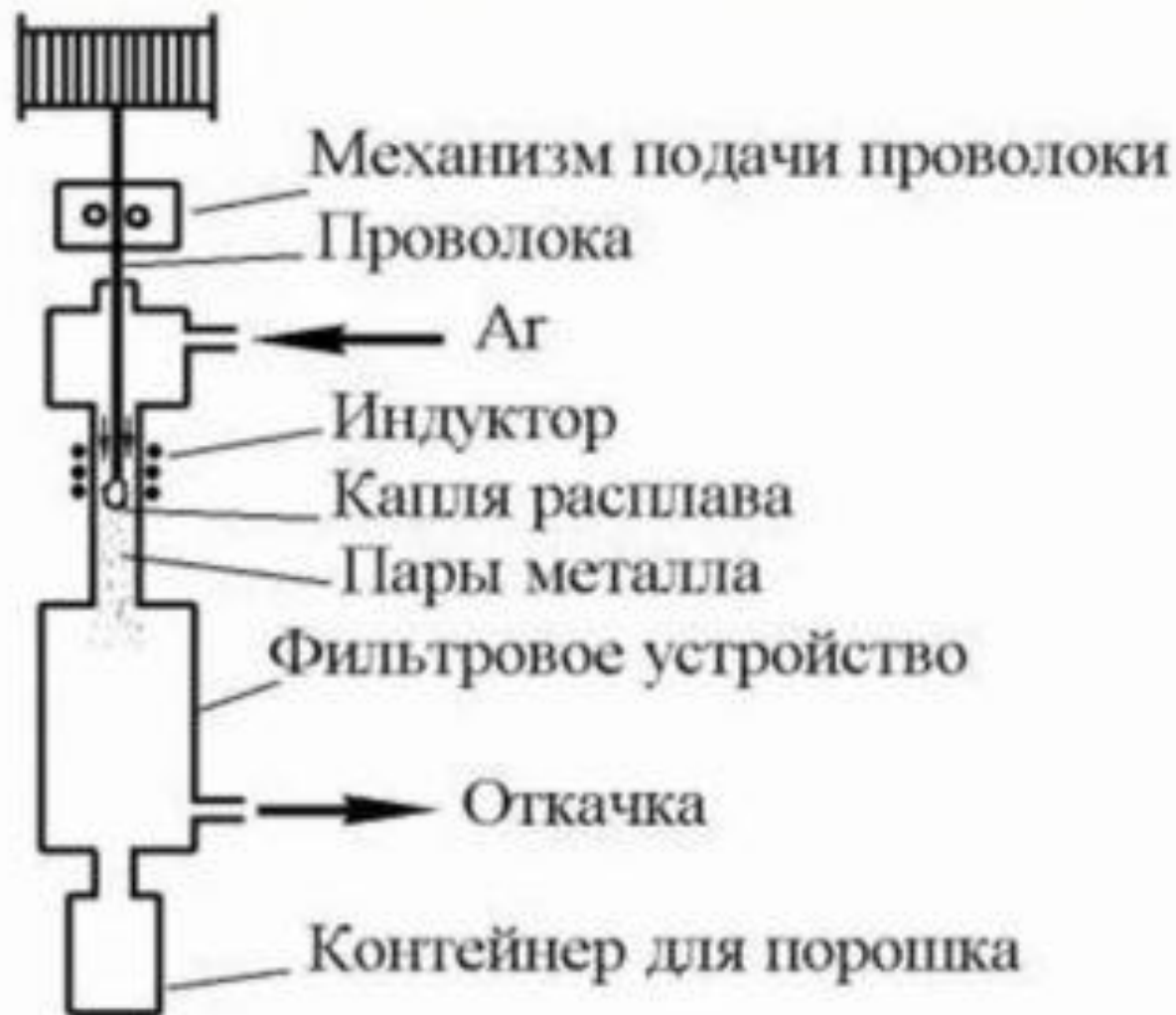




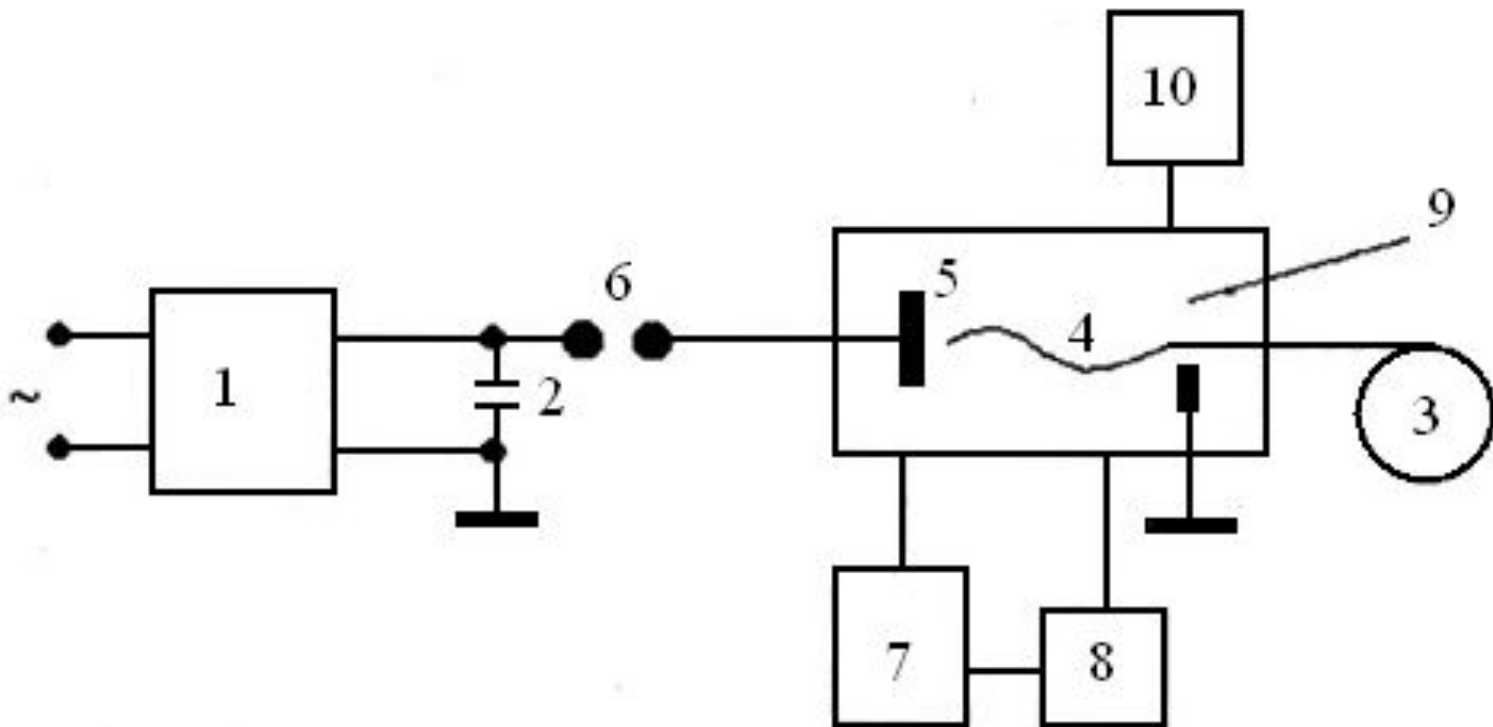
**Планетарная мельница ПМ-1**



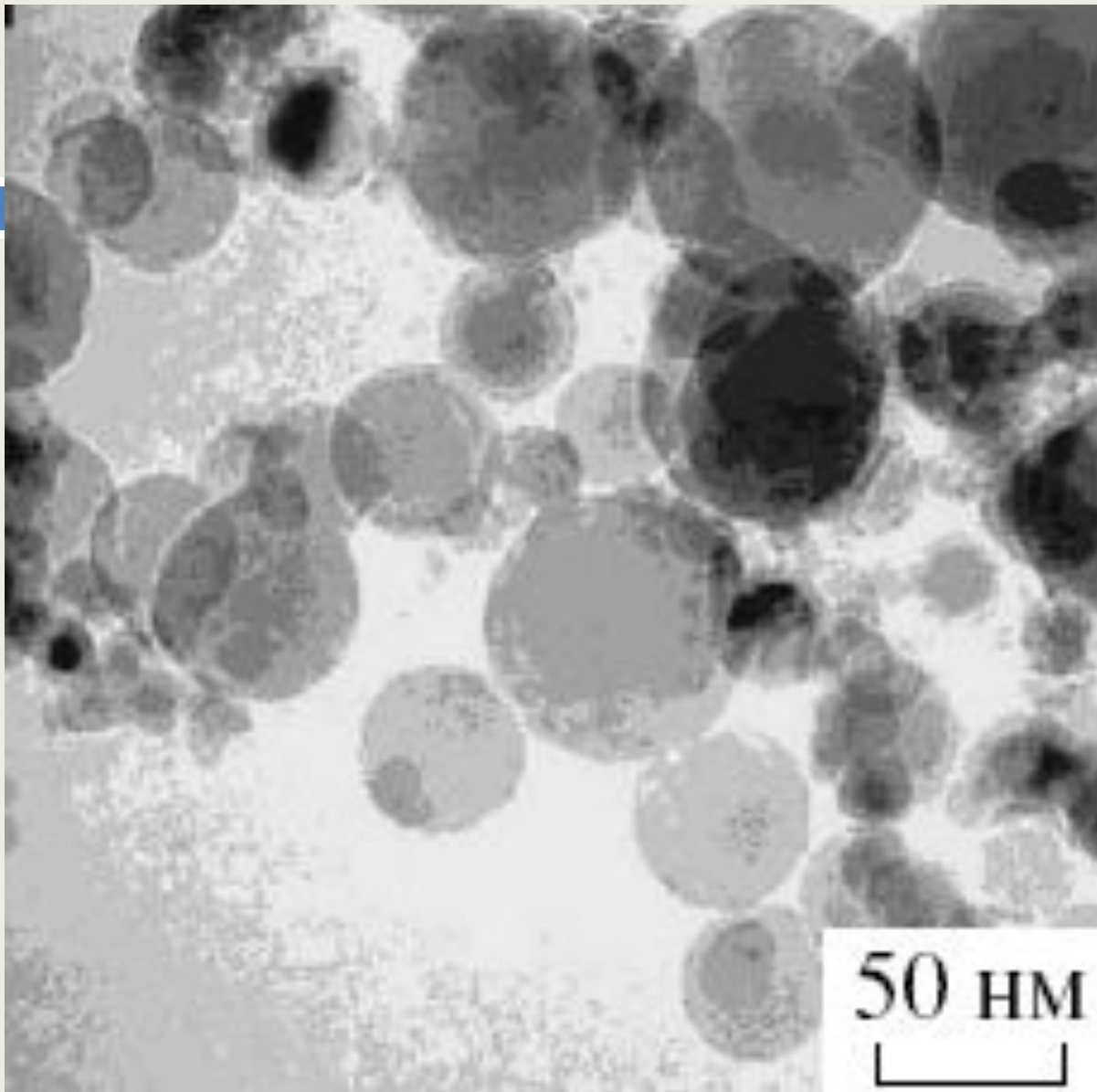
# Левитационо-струйный метод



# Метод электрического взрыва проводников (ЭВП)



1 - источник питания, 2 - емкостной накопитель, 3 - механизм подачи проволоки, 4 – проволока, 5 - высоковольтный электрод, 6 - коммутатор, 7 - накопитель НП, 8 – вентилятор, 9 - камера.



**НП ЭВП FeAl**

# Плазмохимический синтез (ПХС)

## Процессы:

- генерация плазмы,
- смешение сырья с плазмой,
- нагрев сырья, испарение, термическое разложение
- химическая реакция,
- образование и рост частиц,
- охлаждение.

Вследствие высокой температуры плазмы, особых газодинамических и теплофизических условий в плазмохимическом реакторе, все физико-химические процессы протекают с очень высокими скоростями за промежуток времени порядка 0,01-0,001 с.

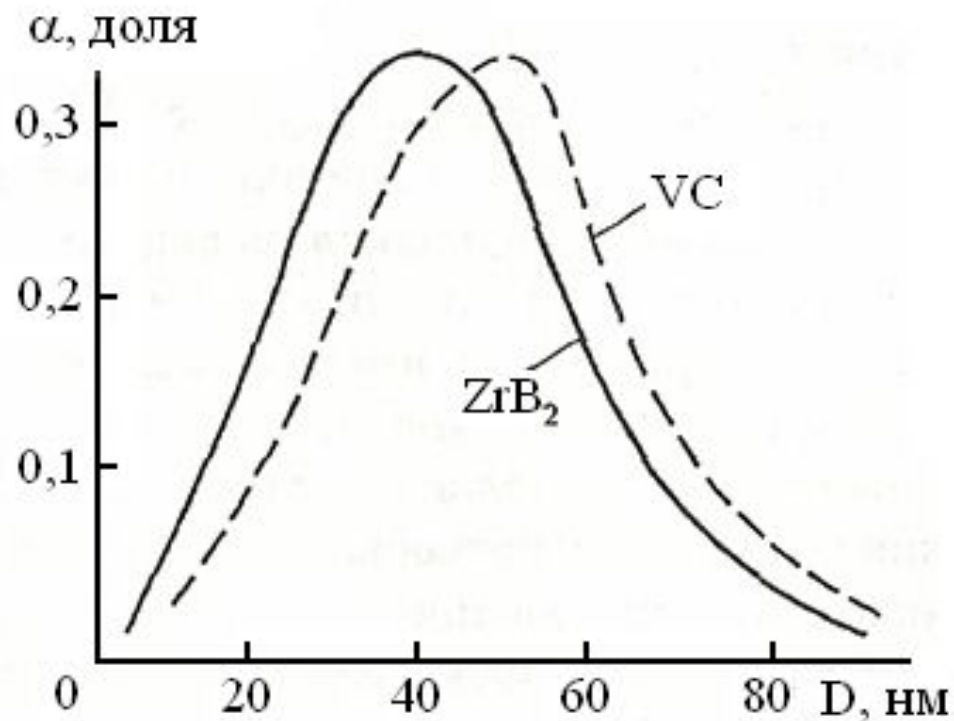
# Плазмохимический синтез (ПХС)

## Процессы:

- генерация плазмы,
- смешение сырья с плазмой,
- нагрев сырья, испарение, термическое разложение
- химическая реакция,
- образование и рост частиц,
- охлаждение.

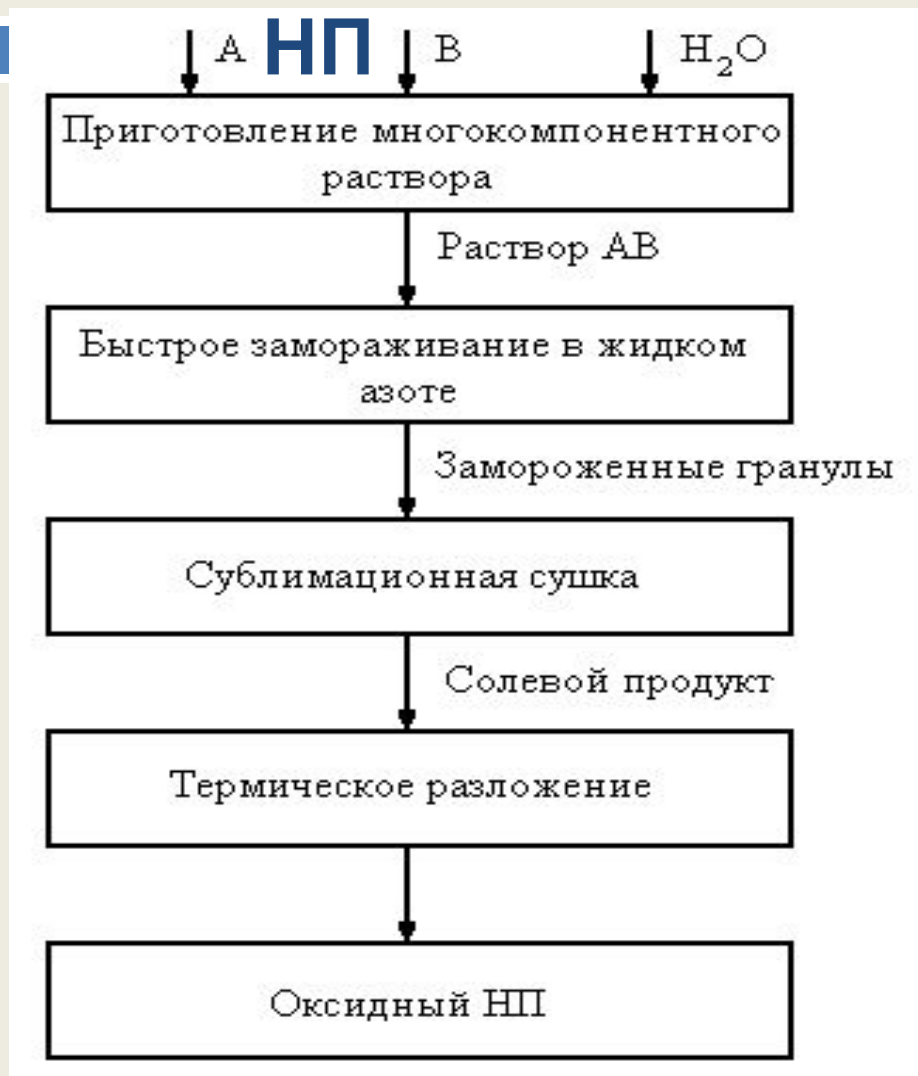
## Достоинства ПХС:

универсальность,  
производительность.



Распределение по размерам НП ПХС  $ZrB_2$  и VC

# Криохимический синтез



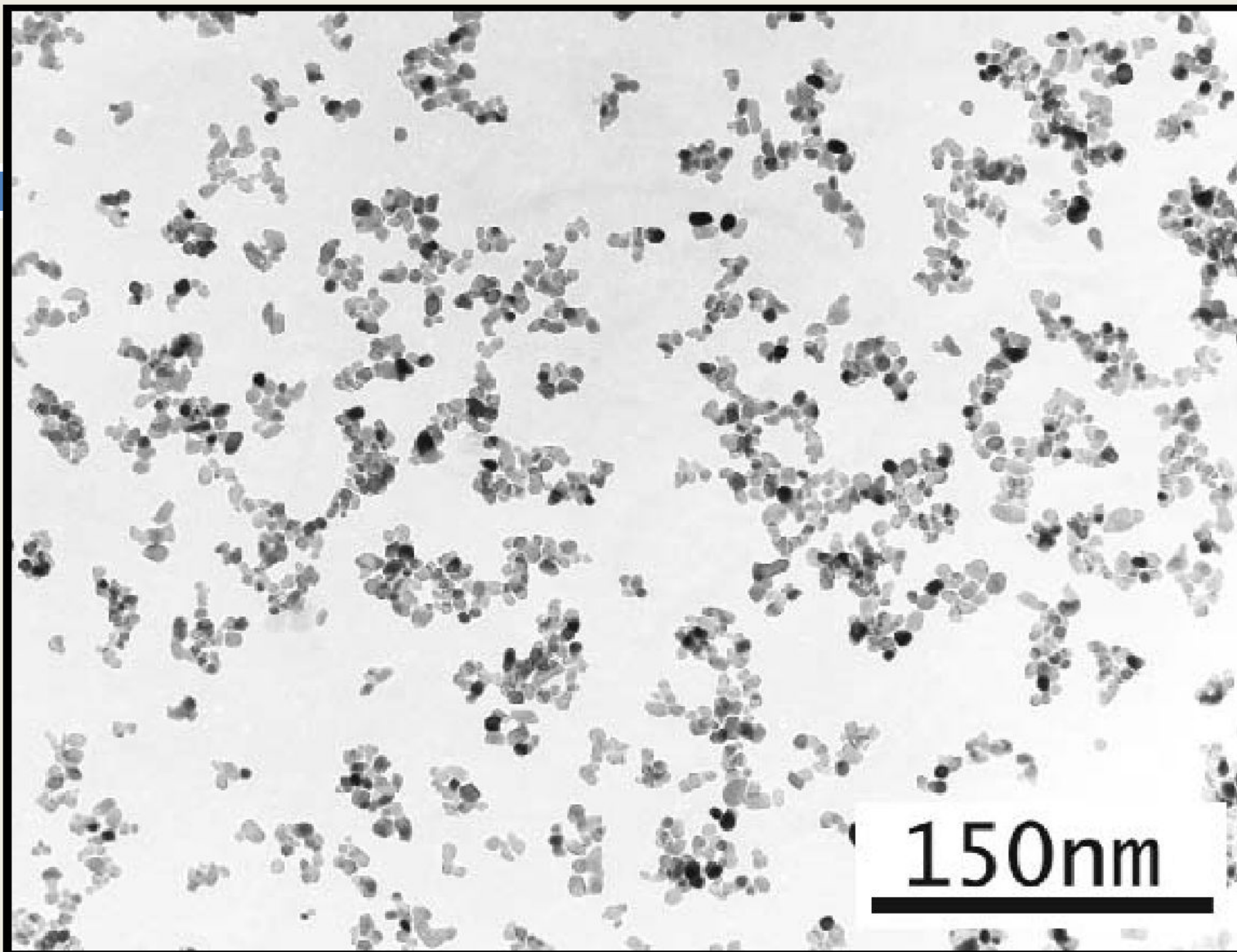
Криохимический синтез НП оксидов



# Осаждение из растворов

**В качестве осадителя наиболее часто используют растворы аммиака, а в качестве осаждаемых веществ - растворимые нитраты.**

**Недостатки: длительность, значительное содержание примесей, заметный рост частиц в процессе синтеза, значительный разброс частиц по размерам.**



**НП  $ZrO_2$ , полученный осаждением**

## «Золь-гель» метод (sol-gel)»

Перспективным методом получения НП является процесс «золь-гель» разработанный для оксидной керамики. Стадиями процесса являются: приготовление растворов алкоксидов, их каталитическое взаимодействие с последующим гидролизом и конденсационная полимеризация с гидролизом. В результате образуется оксидный полимер (гель), который затем подвергают старению, промывке, сушке и термической обработке.

# Метод парофазного разложения летучих металлоорганических соединений

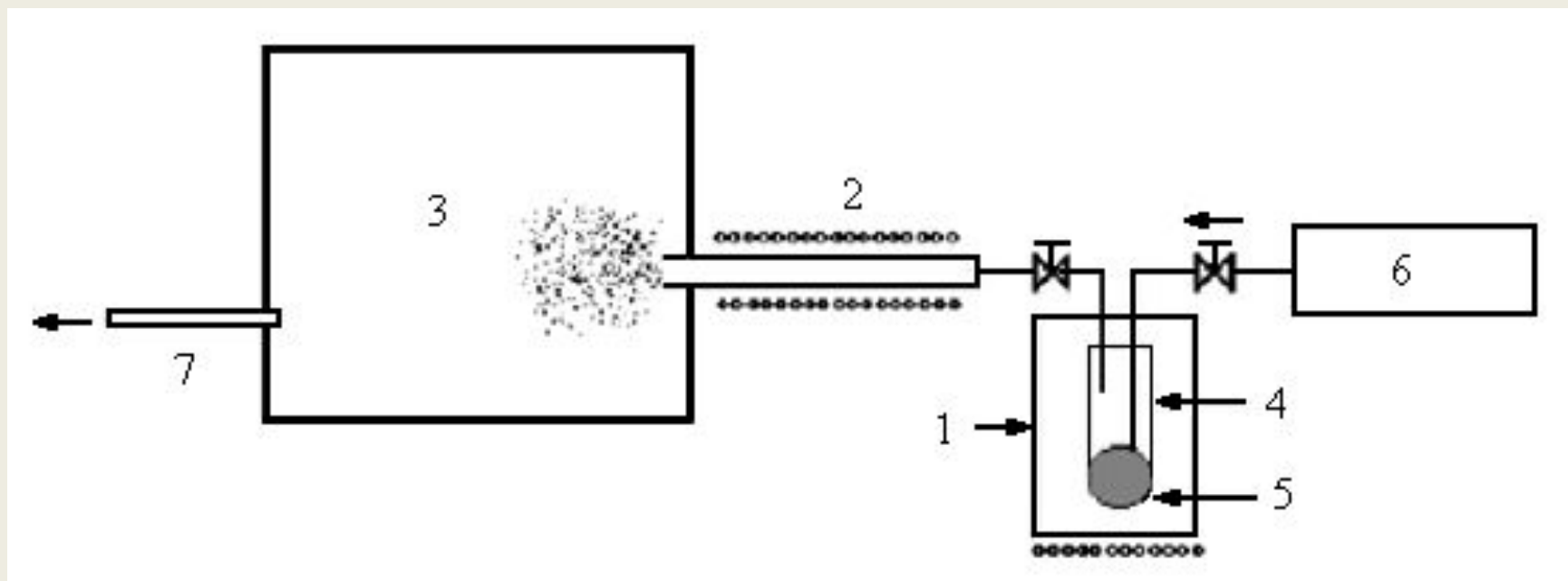



Схема экспериментальной установки: 1 – термостат; 2 – трубчатая печь; 3 – рабочая камера; 4 – испаритель; 5 – прекурсор; 6 – баллон с газом; 7 – фильтр

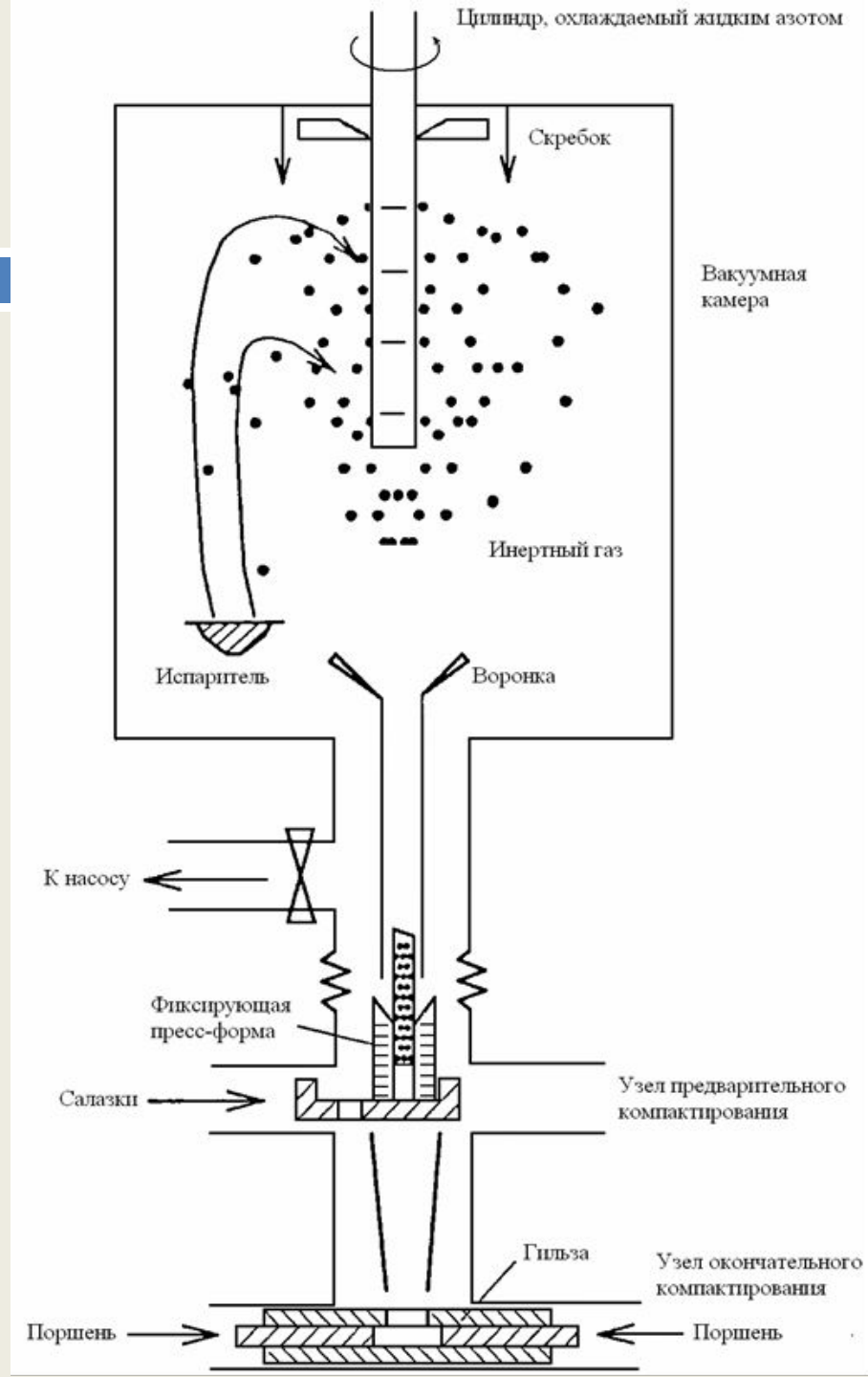


**Прессование – это процесс формования порошка под давлением в изделие с заданной формой, размерами и плотностью.**

**Основные методы прессования НП:**

- одноосное статическое**
- *in situ***
- динамическое (магнитно-импульсное, взрывное)**
- всестороннее изостатическое.**

Компактирование *in situ* по Гляйтеру  
Испарение и конденсация в  
происходит среде гелия.  
Предварительное (под давлением ~  
1 ГПа) и окончательное (под  
давлением до 10 ГПа) прессование  
проводится в вакууме при  
соответствующих температурах.  
Получают пластинки диаметром 5-15  
мм и толщиной 0,2-0,3 мм с  
относительной плотностью 70-97%.





## Спекание НП

$$x^2 \sim T, \\ \Delta l \neq 0$$

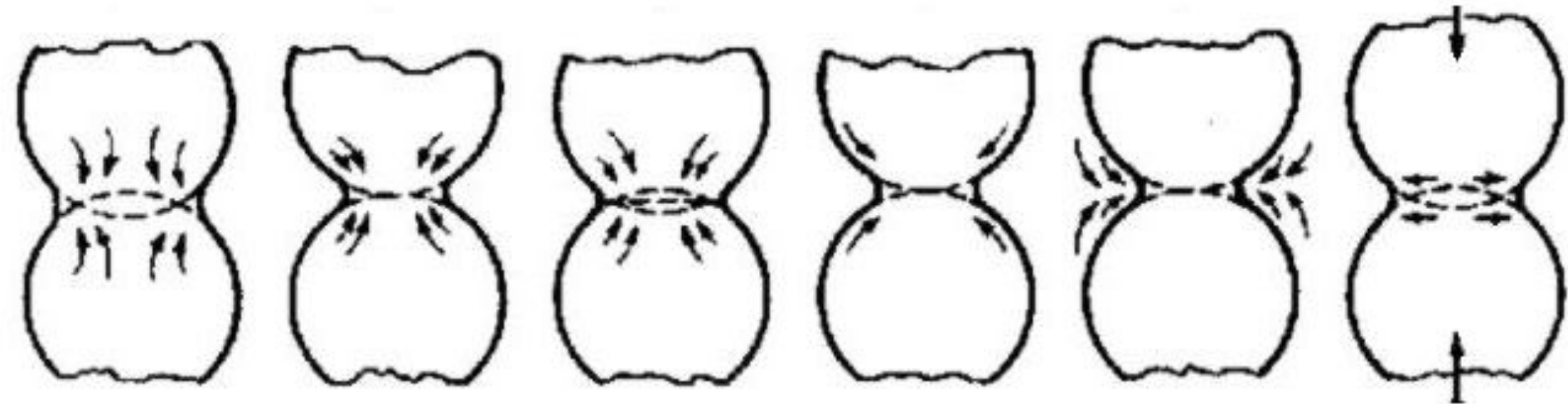
$$x^5 \sim T, \\ \Delta l = 0$$

$$x^5 \sim T, \\ \Delta l \neq 0$$

$$x^7 \sim T, \\ \Delta l = 0$$

$$x^5 \sim T, \\ \Delta l = 0$$

$$x^4 \sim T, \\ \Delta l \neq 0$$



1. Вязкое течение. Для аморфных материалов
2. Объемная диффузия
3. Объемная диффузия при наличии аморфной граници или дислокаций между частицами
4. Поверхностная диффузия
5. Перенос через газовую фазу вследствие разности давлений
6. Граничная диффузия

# Интенсивная пластическая деформация (ИПД)

- кручение под высоким давлением (КВД);
- равноканальное угловое (РКУ) прессование;
- всесторонняя ковка;
- мультиосевая деформация;
- знакопеременный изгиб;
- аккумуляруемая прокатка;
- винтовое прессование.

## Особенности методов ИПД:

- деформирование заготовки с большими степенями деформации при относительно низких температурах  $T < (0,3-0,4)T_{пл}$  и высоком давлении
- формирование однородной наноструктуры с большеугловыми границами зерен.