

Физика. Лекция 12

Явления переноса (*продолжение*)

Реальные газы

В.И. Читайкин

кандидат физико-математических наук
доцент

План лекции



Наименование раздела	Номер слайда
Введение	3
Часть 1. Явления переноса в газах. Диффузия.	4
Раздел 1.1 Основные положения (<i>повтор</i> : лекция 11, часть 2, раздел 2.1)	4
Раздел 1.2 Диффузия в газах	7
Раздел 1.3 Свойства коэффициентов теплопроводности, вязкости и диффузии в газах	10
Раздел 1.4 Ультразреженный газ(вакуум)	13
Часть 2. Явления переноса в жидкости.	16
Раздел 2.1 Тепловое движение частиц в жидкости	16
Раздел 2.2 Теплопроводность, вязкость и диффузия в жидкости	18
Часть 3. Реальные газы.	21
Раздел 3.1 Зачем нужен «реальный» газ? <i>или</i> : Чем плох «идеальный» газ?	21
Раздел 3.2 Уравнение состояния реального газа (уравнение Ван-дер-Ваальса)	24

Введение



Общие замечания

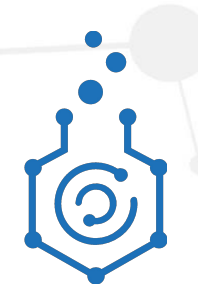
Лекция 12 состоит из трёх частей.

Первая часть является тематическим продолжением части 2 лекции 11 и посвящена одному из явлений переноса *в газах*, а именно: диффузии. В предыдущей лекции были рассмотрены другие два явления переноса *в газах*: теплопроводность и вязкость. Для сохранения целостности раздел «Общие положения» из части 2 лекции 11 полностью повторён в этой лекции.

Во второй части лекции 12 будут рассмотрены явления переноса *в жидкостях*.

Третья часть лекции 12 посвящена так называемым «*реальным газам*» в отличие от ранее изучавшихся *идеальных* газов.

Часть 1. Явления переноса в газах.



Раздел 1.1 Основные положения

(Этот раздел совпадает с разделом 2.1 лекции 11)

1.1 Явления переноса. Основные положения.



1.1.1 Определения

Явления переноса – это особые необратимые процессы в термодинамически неравновесных системах, в результате которых происходит **пространственный** перенос энергии, массы, импульса.

Явления переноса – это:

- теплопроводность: обусловлена переносом энергии,
- диффузия: обусловлена переносом массы,
- внутреннее трение: обусловлено переносом импульса.

При изучении явлений переноса необходимо использовать основные положения как термодинамики, так и молекулярно-кинетической теории.

1.1 Явления переноса. Основные положения.



1.1.2 Механизмы переноса

Механизмы переноса энергии, массы, импульса в веществе различны.

1. Квантовый уровень: перенос осуществляется путём излучения элементарных частиц, среди них основные: гамма-кванты, нейтроны, α -, β -частицы и др.

2. Молекулярный уровень: перенос осуществляется путём перемещения в пространстве молекул и атомов.

3. Макроскопический уровень: перенос осуществляется путём пространственного перемещения значительных масс, объёмов друг относительно друга.

В части 1 данной лекции изучение явлений переноса *в газах*, а именно, диффузии, будет проводиться на молекулярном уровне.

Замечание 1. В лекции 11 изучались два других явления переноса *в газах*: теплопроводность и вязкость (внутреннее трение).

Замечание 2. Общие положения, изложенные в этом разделе 1.1, справедливы и для явлений переноса в жидкости, которым посвящена часть 2 этой лекции.

Часть 1. Явления переноса в газах



Раздел 1.2 Диффузия в газах.

1.2 Диффузия в газах



2.2.1 Определение. Закон Фика

Диффузия – процесс взаимного проникновения частиц (молекул, атомов) одного вещества между частицами другого вещества, приводящий к самопроизвольному выравниванию их **концентраций** по всему занимаемому объёму. Это приводит к тому, что граница между веществами «размывается».

Перенос вещества происходит из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией.

В соответствии с изменениями концентраций веществ изменяются (выравниваются) и их плотности.

Экспериментально установлено, что чем выше начальная неравномерность концентрации по пространству, т.е. чем больше градиент концентрации ($\text{grad}C = dC/dx$), тем быстрее идёт диффузия. Это – закон Фика:

$$J = - D \frac{dC}{dx}$$

J – плотность массового потока, т.е. масса, переносимая через единичную площадку, перпендикулярную оси x , за единицу времени, $[J] = \text{кг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$;

D – коэффициент диффузии.

Знак «**минус**» означает, что масса переносится «против» возрастания концентрации, т.е. из области с **большой** концентрацией в область, где концентрация меньше.

1.2 Диффузия в газах



1.2.2 Коэффициент диффузии для идеального газа

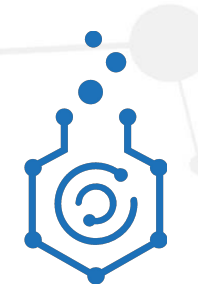
Коэффициент диффузии – это величина экспериментальная. Но для идеального газа этот коэффициент может быть получен аналитически в рамках молекулярно-кинетической теории. Опуская громоздкие вычисления, получим:

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle$$

$\langle v \rangle$ – средняя скорость теплового движения молекул,

$\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекулы.

Часть 1. Явления переноса в газах



Раздел 1.3 Свойства коэффициентов теплопроводности, вязкости и диффузии в газах.

1.3 Свойства коэффициентов в газах



1.3.1 Связь коэффициентов теплопроводности, вязкости и диффузии

Коэффициент теплопроводности	$\lambda = \frac{1}{3} \rho l c_v u$
Коэффициент внутреннего трения (вязкости)	$\eta = \frac{1}{3} \rho l u$
Коэффициент диффузии	$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle$

$u, v, \langle v \rangle$ – средняя скорость
теплового движения молекул
(разные обозначения)

$l, \langle l \rangle$ – средняя длина
свободного пробега
молекулы (разные
обозначения)

Все три коэффициента «похожи». Они получены с использованием одних и тех же характеристик теплового движения частиц: средней скорости и средней длины свободного пробега.

Связь между коэффициентами:

$$\eta = \rho \times D$$

$$\lambda = c_v \times \eta$$

1.3 Свойства коэффициентов в газах



1.3.2 Зависимость от температуры, давления и от размеров частиц

	Общая функциональная зависимость (m – масса частицы)	Зависимость от температуры T	Зависимость от давления P (или от концентрации частиц n)	Зависимость от размера частиц d (диаметр частицы)
Коэффициент теплопроводности, λ	$\lambda \sim (1/d^2) \times (T/m)^{1/2}$	Теплопроводность растёт с температурой, $\sim T^{1/2}$	Теплопроводность не зависит от давления	Теплопроводность быстро падает с ростом размера частиц, $\sim 1/d^2$
Коэффициент внутреннего трения (вязкости), η	$\eta \sim (1/d^2) \times (T \cdot m)^{1/2}$	Вязкость растёт с температурой, $\sim T^{1/2}$	Вязкость не зависит от давления	Вязкость быстро падает с ростом размера частиц, $\sim 1/d^2$
Коэффициент диффузии, D	$D \sim 1/n \times (1/d^2) \times (T/m)^{1/2}$	Диффузия растёт с температурой, $\sim T^{1/2}$	Диффузия падает с ростом давления, $\sim (1/P)$, т.к. $P \sim n$	Диффузия быстро падает с ростом размера частиц, $\sim 1/d^2$

Часть 1. Явления переноса в газах



Раздел 1.4 Ультраразреженный газ (вакуум).

1.4 Ультраразреженный газ (вакуум)



1.4.1 Определение

Вакуум – это состояние газа, в котором средняя длина свободного пробега частицы $\langle l \rangle$ сопоставима или больше геометрических размеров сосуда d , в котором газ заключён.

Ультраразреженный газ – это такое состояние газа, когда $\langle l \rangle$ *много больше* d .

В таких газах число столкновений частиц друг с другом *много меньше*, чем число столкновения частиц со стенками сосуда. Это приводит к особенностям в теплопроводности, вязкости и диффузии.

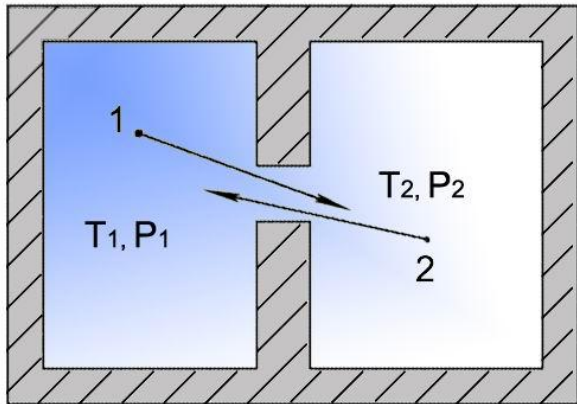
1. *Теплопередача* от одной стенки сосуда с температурой T_1 к другой с T_2 *растёт с ростом давления P* (или концентрации частиц n), т.к. увеличивается частота соударений частиц со стенками. В обычных газах зависимости от давления нет.
2. *Вязкость* в ультраразреженных газах *отсутствует*, т.к. отсутствует внутреннее трение (практически нет столкновений частиц друг с другом).
3. *Диффузия*, приводящая к выравниванию неоднородностей, происходит практически мгновенно, поэтому далее, после «выглаживания» неоднородностей, её *практически нет*.

1.4 Ультраразреженный газ (вакуум)



1.4.2 Эффузия

Эффузия – это явление истечения ультраразреженного газа через небольшое отверстие, когда длина свободного пробега частиц $\langle l \rangle$ *много больше диаметра* этого отверстия d .



Условие равновесия процесса перетекания газа из полости 1 в полость 2 и обратно: $n_1 v_1 = n_2 v_2$

где n_1, n_2 – концентрация частиц в полости 1 или 2;

v_1, v_2 – средние скорости теплового движения частиц в полости 1 или 2.

Т.к. скорость $v \sim T^{1/2}$, то уравнение состояния ультраразреженного газа:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{n_1 k T_1}{n_2 k T_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

Для сравнения: уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона-Менделеева): $(P_1/P_2) \sim (T_1/T_2)$.

Часть 2. Явления переноса в жидкостях.



Раздел 2.1 Тепловое движение частиц в жидкости

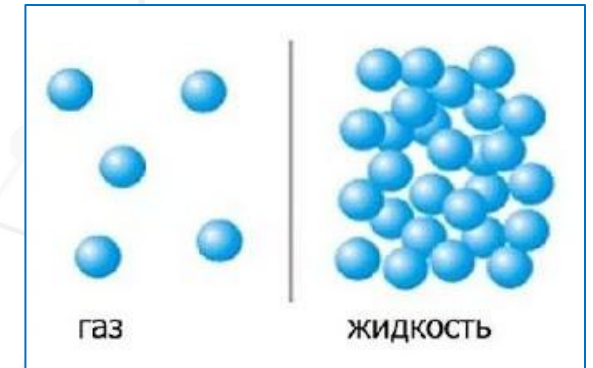
2.1 Тепловое движение частиц в жидкости

2.1.1 Основные понятия



Частицы в жидкости расположены значительно ближе друг к другу, чем в газах, из-за различия в плотности, т.е. в концентрации.

Частицы находятся в тесном окружении других частиц (в «упорядоченном строю») и совершают нерегулярные, стохастические колебания относительно некоторых *центров колебаний*.



Средняя кинетическая энергия частиц, как правило, недостаточна для преодоления сил межмолекулярного взаимодействия в таком «строю». Но в какой-то момент, в силу статистичности процессов, этой энергии может оказаться достаточно для преодоления межмолекулярных связей. Тогда частица может скачком перейти в окружение других частиц, поменяв, тем самым, центр колебаний.

Интервал времени между такими перескоками называется «временем оседлой жизни» частиц τ . Например, для воды при комнатной температуре: $\tau \sim 10^{-11}$ с. За это время частица совершает до 100 колебаний относительно одного центра.

Время оседлой жизни частицы быстро уменьшается с ростом температуры: $\tau \sim \tau_0 \times e^{(1/kT)}$.

Часть 2. Явления переноса в жидкостях.



Раздел 2.2 Теплопроводность, вязкость и диффузия в жидкости

2.2 Теплопроводность, вязкость, диффузия



2.2.1 Механизм явлений переноса в жидкости

Общие понятия явлений переноса в *жидкости*: теплопроводности, вязкости и диффузии, - такие же, как в газах (см. раздел 1.1 этой лекции). Здесь мы отметим некоторые особенности применительно к жидкостям.

Теплопроводность в жидкости создаётся путём передачи теплового движения от более высоко-энергичных частиц (с большей температурой) к менее энергичным частицам (с меньшей температурой). Такая передача осуществляется при непосредственном контакте (соударении) частиц друг с другом.

Вязкость в жидкости создаётся силами межмолекулярного взаимодействия (сцепления) частиц, довольно тесно расположенных и поэтому сильнее, чем в газах, удерживающих друг друга.

Диффузия в жидкости создаётся путём прохождения (проникновения) частицы сквозь хорошо упорядоченный «строй» других частиц, близко расположенных друг к другу. Диффузия жидкости идёт значительно медленнее, чем газах.

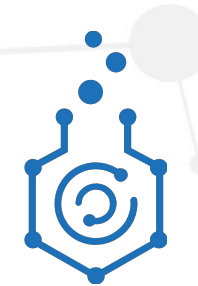
2.2 Теплопроводность, вязкость, диффузия



2.2.2 Основные зависимости коэффициентов в жидкости

	Значения (примеры)	Зависимость от температуры T	Зависимость от давления P
Коэффициент теплопроводности, λ	Вода: $\lambda = 0,6$ Вт/(м К) Ртуть: $\lambda = 8,5$ Вт/(м К) Воздух (для сравнения): $\lambda = 2,6 \times 10^{-5}$ Вт/(м К)	Теплопроводность падает с ростом температуры (не очень сильно)	Теплопроводность не зависит от давления
Коэффициент внутреннего трения (вязкости), η	Вода: $\eta = 0,0018$ Па $\times$ с (пуаз) Глицерин безводный: $\eta = 1,5$ Па $\times$ с (пуаз)	Вязкость падает с ростом температуры	Вязкость почти не зависит от давления (слабо падает)
Коэффициент диффузии, D	Вода в спирте: $D = 1,2 \times 10^{-9}$ м ² /с Глицерин в спирте: $D = 0,008 \times 10^{-9}$ м ² /с	Диффузия растёт с температурой	Диффузия практически не зависит от давления

Часть 3. Реальные газы



Раздел 3.1 Зачем нужен «реальный» газ? *или:* Чем плох «идеальный» газ?

3.1 Зачем нужен «реальный» газ? или ...



3.1.1 Область применения моделей

Любая физическая модель имеет ограниченную область применения.

Модель «идеального» газа и связанные с ней уравнения, графики, хорошо «работают» при нормальных и умеренных параметрах: температура, давление. Таблица иллюстрирует это утверждение. Газ – азот. Сжатие при постоянных: объёме ($V = 1$ литр), температуре ($T = 0^{\circ}\text{C}$), массе.

Давление, атм	Значение параметра (PV), атм×л		
	Расчёт по модели «идеальный» газ*)	Эксперимент	Расчёт по модели «реальный» газ**)
1	1	1,00	1,00
100	1	0,99	1,00
200	1	1,05	1,01
500	1	1,39	1,014
1000	1	2,07	0,89

*) Т.е. расчёт по уравнению Клапейрона-Менделеева
**) Т.е. расчёт по уравнению Ван-дер-Ваальса

фер.

3.1 Зачем нужен «реальный» газ? или ...



3.1.2 Причины «неудач» модели идеального газа

Этих причин две.

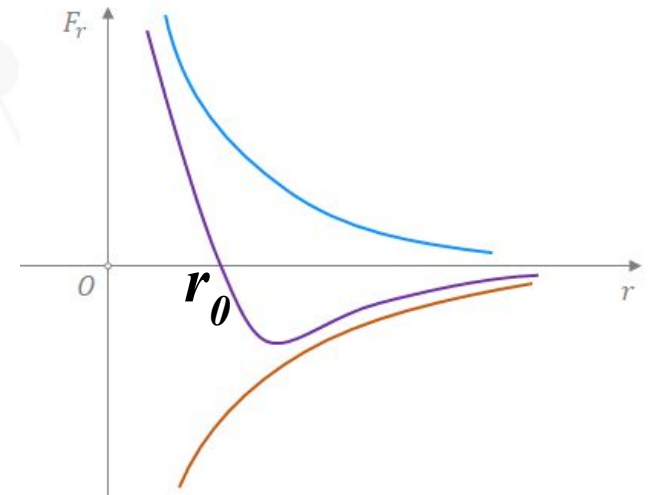
1. В модели идеального газа предполагается, что размерами частиц можно пренебречь; частицы заменены на материальные точки, размеры которых пренебрежимо малы. Но в реальности, при давлениях 1000...5000 атм частицы будут занимать от 10% до 50% объёма (половина!), т.е. они совсем не точки.

Это надо обязательно учитывать в уравнении состояния газа.

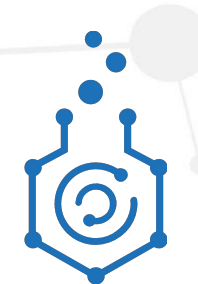
2. В модели идеального газа предполагается, что частицы никак не взаимодействуют друг с другом, кроме чрезвычайно краткого момента соударения. Но в реальности, сила взаимодействия (F_r) на расстоянии r между центрами частицам имеет сложный вид (фиолетовая кривая). Она складывается из сил отталкивания (синяя кривая) и сил притяжения (красная кривая).

Важно: в интересующей нас области значений $r \geq r_0$ частицы притягиваются ($F_r < 0$), даже если они находятся на значительном расстоянии друг от друга, $r > r_0$.

Это также надо обязательно учитывать в уравнении состояния газа.



Часть 3. Реальные газы



Раздел 3.2 Уравнение состояния реального газа. (Уравнение Ван-дер-Ваальса)

3.2 Уравнение состояния реального газа



3.2.1 Уравнение Ван-дер-Ваальса

В уравнение состояния идеального газа должны быть внесены две поправки.

Исходное уравнение: $pV_m = RT$ (это уравнение Клапейрона-Менделеева для 1 моля газа)

Поправка 1: *Учёт собственного объёма частиц (или: учёт размера частиц).*

$V_m \rightarrow V_m - b$, где b – объём, занятый самими молекулами, значение b равно учетверённому объёму одной частицы (*чисто геометрический подход*).

Поправка 2: *Учёт притяжения молекул*, приводящее к дополнительному, внутреннему давлению в газе.

$p \rightarrow p + a/(V_m)^2$, где a – постоянная Ван-дер-Ваальса (*по сути, подгоночный параметр*).

Тогда, уравнение состояния реального газа (уравнение Ван-дер-Ваальса) будет иметь вид:

- для 1 моля газа:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

- для произвольного
количества вещества:

$\nu = m/M$ – количество вещества

3.2 Уравнение состояния реального газа



3.2.2 Изотермы Ван-дер-Ваальса (изотермы реального газа)

Построение изотерм реального газа проводится *чисто математическими методами*.

Уравнение Ван-дер-Ваальса может быть переписано следующим образом.

$$PV^3 - (RT + bP)vV^2 + av^2V - abv^3 = 0$$

Получили кубическое уравнение относительно неизвестных: давление P и объём V .

a , b и R – известные постоянные; v – задаваемый постоянный параметр;

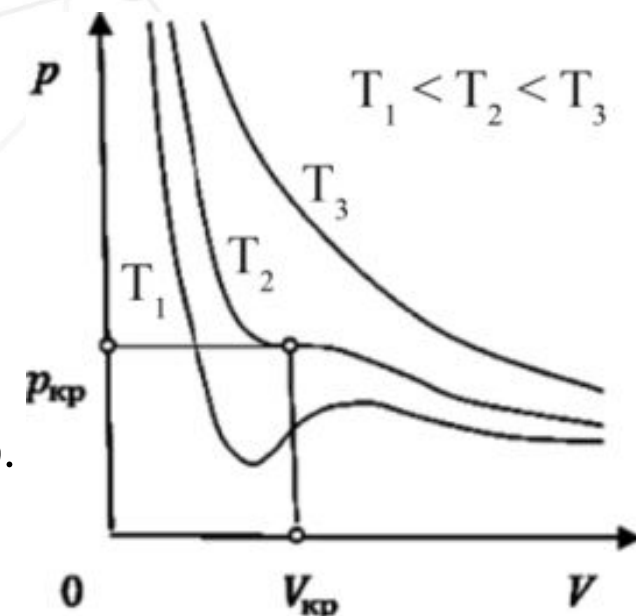
Расчёт изотерм по формуле производится при фиксированных значениях температуры T .

Анализировать поведение изотерм (т.е. решений уравнения) удобнее и нагляднее графически.

1. При высоких значениях температуры (на рис. – T_3) изотерма реального газа мало отличается от изотермы идеального газа.

2. При снижении температуры ($T_3 \rightarrow T_2$) в поведении изотермы появляется плавный изгиб. При $T_2 = T_{кр}$ этот изгиб имеет нулевую производную, на рис. – горизонтальный участок вблизи точки $(P_{кр}, V_{кр})$.

3. При дальнейшем снижении температуры ($T_2 \rightarrow T_1$) в поведении изотермы появляется волнообразный участок.



3.2 Уравнение состояния реального газа

3.2.3 Физический смысл изотерм Ван-дер-Ваальса

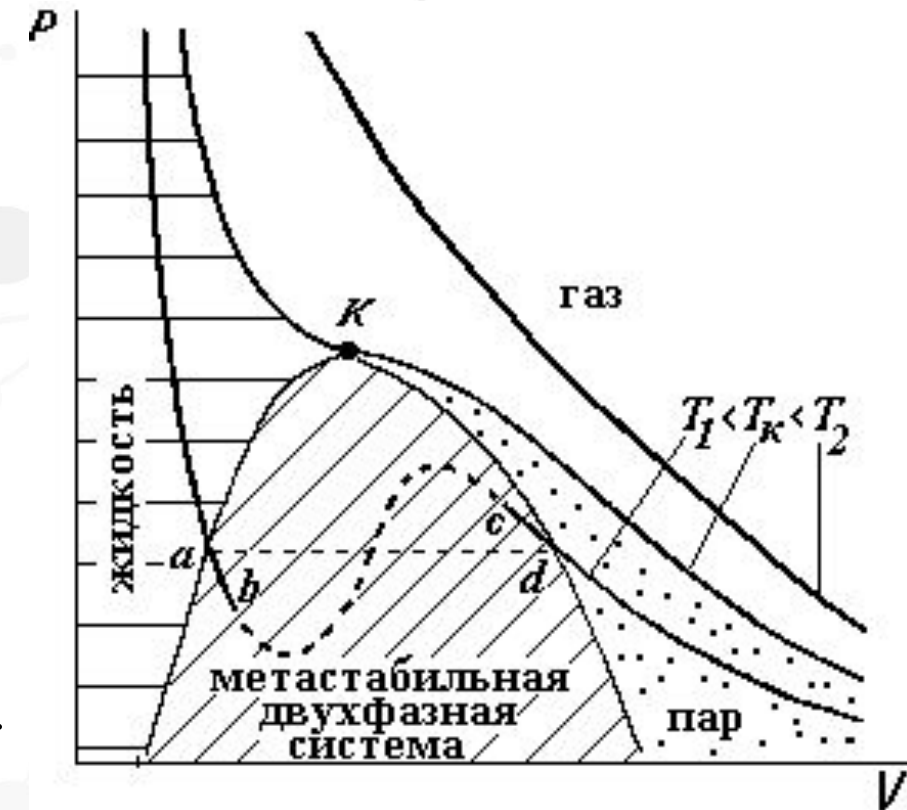


Анализ изотерм реального газа, полученных чисто математическим способом, позволил получить ряд физически очень важных результатов.

1. Получена *фазовая диаграмма* состояний вещества, т.е. определены области существования вещества в виде жидкости, в газообразном состоянии а также в виде пара. Определены границы между этими состояниями.

2. Выделена и изучена обширная область, в которой вещество существует в виде *метастабильной двухфазной системы* (участок ***ab*** – перегретая жидкость, участок ***cd*** – перенасыщенный пар).

3. Найдена и объяснена *критическая точка K*, в окрестности которой вещество может существовать в жидкой и в газообразной форме, а также в виде пара и метастабильной двухфазной системы.



Важно: фазовая диаграмма (изотермы Ван-дер-Ваальса) рассчитываются и экспериментально определяются для каждого вещества отдельно. Общий вид диаграммы остаётся неизменным.



**Изучение темы «Реальные газы»
будет продолжено на следующей лекции.**

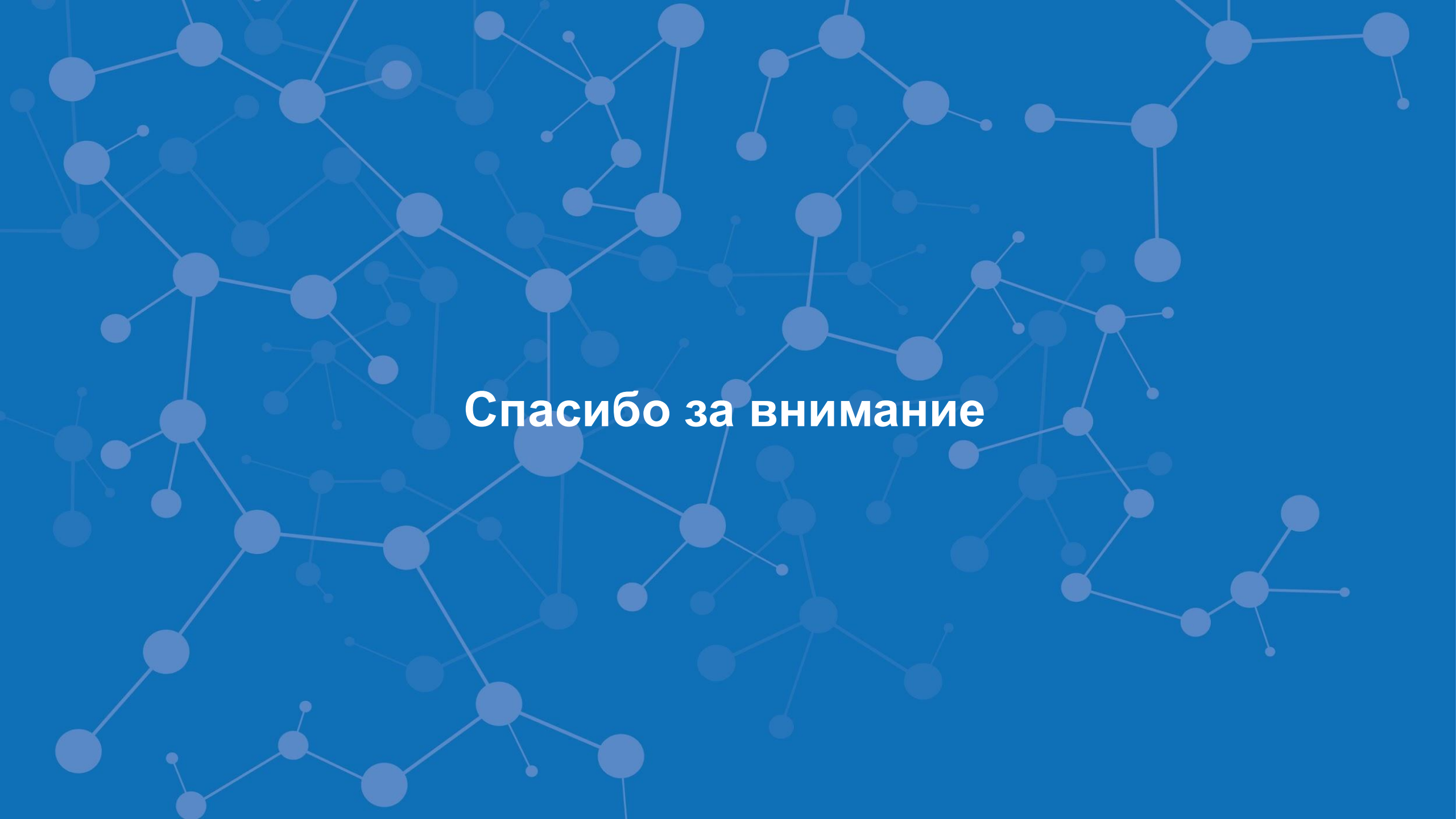
Вопросы в экзаменационных билетах



1. Явления переноса. Теплопроводность.
2. Явления переноса. Внутреннее трения (вязкость).

Важно.

Вопросы совпадают с названиями разделов и подразделов лекции

The background is a solid blue color with a complex, abstract network of white lines and circles. The circles vary in size, and the lines connect them in a non-uniform, organic pattern, resembling a molecular structure or a data network. The text is centered in the middle of the image.

Спасибо за внимание