

# **ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Люблинский Игорь Евгеньевич

к.т.н., начальник отдела АО «Красная Звезда»

8 916 202 7340

# Дальний и ближний порядок

Упорядоченность на расстояниях, сравнимых с межатомными, называется **ближним порядком**, а упорядоченность, повторяющаяся на неограниченно больших расстояниях, — **дальним порядком**. В идеальном газе расположение атома в какой-либо точке пространства не зависит от расположения других атомов. Т. о., в идеальном газе отсутствует Д. п. и б. п., но уже в жидкостях и аморфных телах существует ближний порядок — некоторая закономерность в расположении соседних атомов. На больших расстояниях порядок «размывается» и постепенно переходит в «беспорядок», т. е. дальнего порядка в жидкости и аморфных телах нет.

В кристаллах атомы расположены правильными пространственными решётками и правильное чередование атомов на одних и тех же расстояниях друг относительно друга повторяется для сколь угодно отдалённых атомов, т. е. существует Д. п. и б. п. Основные признаки дальнего порядка — симметрия и закономерность в расположении частиц, повторяющаяся на любом расстоянии от данного атома. Наличие Д. п. и б. п. обусловлено взаимодействием между частицами.

Понятия Д. п. и б. п. важны для теории сплавов, где они характеризуют степень упорядочения сплава, например в сплаве из двух компонентов при полном упорядочении атомы двух сортов чередуются, т. е. каждый атом окружен ближайшими соседями только из атомов другого сорта. Неполный порядок проявляется в том, что среди соседей появляются атомы того же сорта. Полностью упорядоченное состояние возможно только при абсолютном нуле, т. к. тепловое движение нарушает порядок. В зависимости от тепловой и механической обработки в сплаве могут быть достигнуты разные степени упорядочения; при этом меняются также и физические свойства сплава.

# Радиальная функция распределения

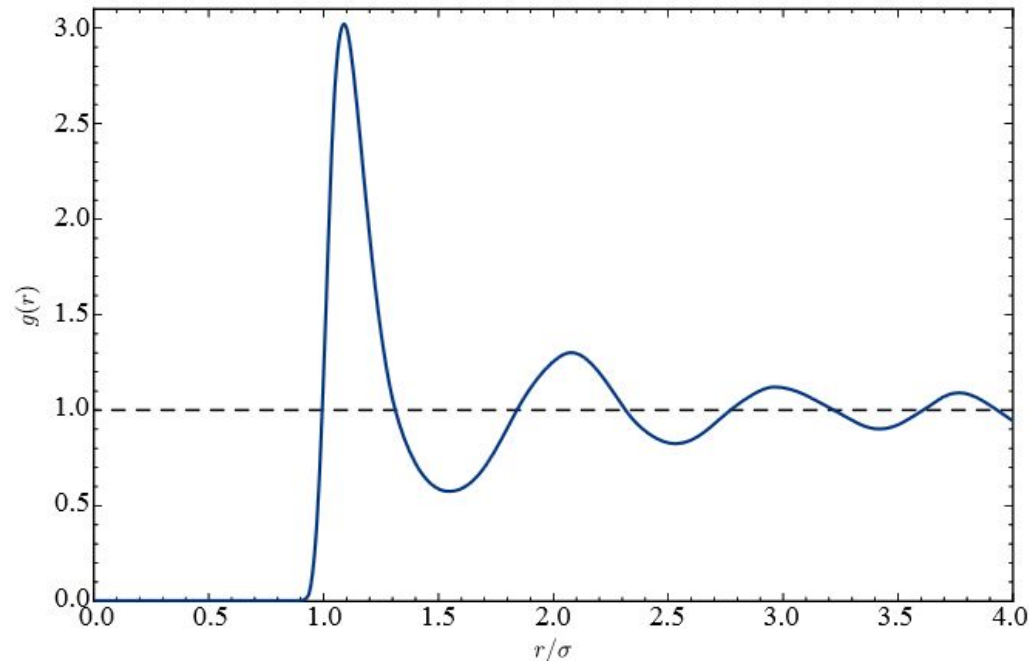
Понятие ближнего порядка вводится через парную функцию распределения  $f_2$  представляется в виде

$$f_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = f_1(\mathbf{r}_1)f_1(\mathbf{r}_2)g(r_{12}),$$

где  $f_1(r)$  - одночастичная функция распределения,

$$r_{12} = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| \text{ - расстояние между двумя атомами (молекулами)}$$

Функция  $g(r)$  носит название радиальной функции распределения



Радиальная функция распределения для жидкости

Почему стоит вопрос об использовании легкоплавких металлов в ядерной энергетике?

Какие легкоплавкие металлы используются на практике и  
какие рассматриваются на перспективу

## **Металлы**

Литий - Li

Натрий - Na

Калий – K

Цезий – Cs

Галлий - Ga

Свинец - Pb

Ртуть – Hg

Олово – Sn

## **Сплавы**

Na-K

Na-K-Cs

Pb-Bi

Pb-Li

Pb-Bi-Li

Sn-Li

В каких областях энергетики используются  
(рассматриваются как реальная возможность  
для использования)  
легкоплавкие металлы?



Исследовательские и экспериментальные ядерные реакторы

## Энергетические ядерные реакторы

- быстрые реакторы для промышленной энергетики
- ядерные реакторы космического базирования
- ядерные реакторы для АПЛ

## Термоядерные системы

- экспериментальные термоядерные установки (токамаки, стеллараторы)
- термоядерный источник нейтронов на базе токамака
- Международный экспериментальный термоядерный реактор ITER (ИТЭР)
- демонстрационный термоядерный реактор ДЕМО

# Теплопередающие системы на базе жидкометаллических тепловых труб

Тэрмоэмиссионные преобразователи тепловой энергии  
в электрическую

# Основные функции легкоплавких металлов

в энергетических системах:

- перенос теплоты потоком металла в конденсированном

состоянии

- перенос теплоты двухфазным потоком легкоплавкого

металла

- наработка трития в реакторах термоядерного синтеза

- защита элементов конструкции энергетических систем,

подвергающихся воздействию энергетических потоков

высокой плотности

- рабочее тело паротурбинных систем преобразования

энергии

Какие вопросы необходимо рассмотреть для обоснования использования легкоплавких металлов в энергетике?

Физические свойства

Химические свойства

Теплофизические характеристики

Термодинамические свойства

Основы металлургии легкоплавких металлов

Технология использования

Принципы конструирования и создания жидкометаллических систем

Вопросы экологии и безопасности

Совместимость легкоплавких металлов с конструкционными материалами



1. Субботин В.И., Размышления об атомной энергетике. СПб.: ОЭЭП РАН, 1995.
2. П.И. Быстров, Д.Н. Каган, Г.А. Кречетова, Э.Э. Шпильрайн. Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок. М.: Наука, 1988.
3. М.Н. Ивановский, В.П. Сорокин, И.В. Ягодкин. Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1978.
4. М.Н. Ивановский, В.П. Сорокин, Б.А. Чулков, И.В. Ягодкин. Технологические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1980.
5. Г.М. Грязнов, В.А. Евтихин, И.Е. Люблинский и др. Материаловедение жидкометаллических систем термоядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Субботин В.И. Испарение и конденсация металлов (теплообмен, массообмен, гидродинамика, технология). М.: Атомиздат, 1976.
7. Бескорвайный Н.М., Иолтуховский А.Г. Конструкционные материалы и жидкометаллические теплоносители. М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольд М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат, 1970.
9. Турчин Н.М., Дробышев А.В. Экспериментальные жидкометаллические стенды. М.: Атомиздат, 1978.

10. Невзоров Б.А., Зотов В.В., Иванов В.А. и др. Коррозия конструкционных материалов в жидких щелочных металлах, М.: Атомиздат, 1977.
11. Никитин В.И. Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые. М.: Атомиздат, 1967.
12. Камдар М.Х. Жидкометаллическое охрупчивание. В кн.: Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов. - М.: Металлургия, 1988. С.333-423.
13. В.Н. Михайлов, В.А. Евтихин, И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, А.Н. Чуманов. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века. М.: Энергоатомиздат, 1999.
14. Основы концепции демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО-С. Часть I-V, ИЯС РНЦ «Курчатовский институт», 1993-2001.
15. Lithium: Technology, Performance and Safety, **Editors:** Francisco L. Tabarés, Nova Publishers, 2013.
16. Космические ядерные энергоустановки и электроракетные двигатели. Конструкция и расчет деталей: Учебное пособие / П.В. Андреев, А.С. Демидов, Н.И. Ежов, М.Ю. Федоров и др. – М: Изд-во МАИ, 2014. 508 с.