

Об эмпирической связи между нормированными значениями теплоты и энтропией плавления и кипения в бинарных соединениях

И. М. Ярцев, В. П. Полищук и Р. А. Усманов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: usmanov.r@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 1 июля 2025 г.

Аннотация. С использованием литературных данных о теплоте и температуре плавления и кипения получены данные об энтропии плавления кристаллов α_m и кипения их расплавов α_b . Для галогенидов и оксидов металлов с ионным типом химической связи, а также для соединений неметаллов с ковалентным типом связи получены данные о зависимости энтропии α_m и α_b от соответствующих энергетических параметров β_m и β_b , равных отношению теплоты фазового перехода к сумме значений теплоты плавления и кипения. Установлен уровень минимальных значений α_b для исследованных расплавов. С использованием статистического анализа оценена плотность локализации энтропии кипения вблизи ее минимальных значений для разных типов расплавов. Получены данные о зависимости от параметра β_m отношения энтропии плавления кристалла к энтропии кипения его расплава.

1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С теоретической и прикладной точки зрения заметный интерес представляет энтропия плавления кристаллов ΔS_m . В соответствии с данными [1–5] эта энтропия определяется многими физическими факторами, в частности, для бинарных кристаллов — ионностью химической связи в кристалле I .

Термодинамическое соотношение между энтропией ΔS_m и другими термодинамическими параметрами на линии плавления описывается уравнением Клайперона–Клазиуса [5]:

$$\Delta S_m = \frac{dP}{dT} \Delta V. \quad (1)$$

В соответствии с уравнением (1) к числу определяющих параметров относятся значения производной dP/dT и изменение объема моля вещества ΔV на линии плавления, данные о которых не охватывают большое количество кристаллов. В этих условиях для анализа, систематизации и оценки величины энтропии плавления до сих пор используют различные эмпирические параметры, описанные, например, в [2–4].

В работе [6] для кристаллов простых или элементарных веществ, использовался энергетический параметр плавления $\beta_m = E_m/E_q$, где E_m — теплота плавления, а E_q — энергия, характеризующая прочность химической связи в кристалле, в качестве которой принималась энергия сублимации кристалла E_c .

В данной работе, являющейся продолжением [6], рассматриваются кристаллы бинарных соединений, для которых имеются ограниченные данные об энергии E_c . Поэтому в качестве энергии E_q используется сумма теплоты плавления кристалла и теплоты кипения его расплава E_b в нормальной точке кипения (НТК), соответствующей нормальному атмосферному давлению, т.е. принимается, что

$$\beta_m = E_m/(E_m + E_b). \quad (2)$$

Аналогично для кипения расплавов вводится энергетический параметр кипения, определяемый по уравнению:

$$\beta_b = E_b/(E_m + E_b). \quad (3)$$

Отметим, что на всех рисунках значения β_m и β_b приводятся в процентах.

По сравнению с известными и рассмотренными в [2–4], введенные параметры β_m и β_b имеют значительно более полную исходную базу данных и более понятный физический смысл.

Кроме того, представленные в [2–4] параметры относятся обычно не ко всей энтропии плавления, а к ее отдельным составляющим. Так, параметр, равный отношению расчетных характерных частот колебаний в атомной подсистеме для кристалла — f_s и расплава — f_l , используется для оценки колебательной составляющей энтропии по уравнению $\alpha_{mf} = 2R \ln(f_s/f_l)$, где R — универсальная газовая постоянная. Подобным образом используется отношение электропроводностей (правило Мотта [4]). А для оценки электронной составляющей энтропии плавления в полупроводниковых кристаллах — α_{me} используется параметр, равный доле свободных электронов в кристалле при температуре плавления — T_m : $\rho = \exp(-\Delta E/2kT_m)$, где ΔE — ширина запрещенной зоны, k — постоянная Больцмана.

Как и в [6] в данной работе рассматриваются безразмерная энтропия плавления кристаллов α_m и кипения расплавов α_b , которые вычислялись по соотношениям:

$$\alpha_m = E_m/RT_m, \quad \alpha_b = E_b/RT_b, \quad (4)$$

где T_m — температура плавления кристалла, T_b — температура кипения расплава.

Между параметрами β_m для данного кристалла и параметром β_b для его расплава из (2) и (3) следует соотношение:

$$\beta_m + \beta_b = 1. \quad (5)$$

Сумма теплот E_m и E_b обычно несколько меньше теплоты сублимации E_c . При этом отношение $E_c/(E_m + E_b)$ зависит от типа кристалла. Так для

рассмотренных в [6] кристаллов простых веществ отношение $E_c/(E_m + E_b)$ изменялось от 0.8 до 1 для металлов и от 0.5 до 1 для полупроводников и металлоидов. При использовании в качестве E_q энергии сублимации кристалла соотношение (5) является приближенным.

По данным [1–6] значения α_m существенно определяются типом и параметрами межатомной или химической связи в кристаллах. Для рассмотренных в [6] кристаллов характерна неполярная связь ковалентного типа.

В данной работе рассмотрено около 200 бинарных кристаллов, включающие в себя ионные кристаллы галогенидов и оксидов металлов (соединений металл–неметалл), для которых по данным [7] в зависимости от разности электроотрицательности атомов кристалла ΔX реализуется связь преимущественно ионного (ориентировочно при $\Delta X > 1.5$) или ионно-ковалентного типа (ориентировочно при $\Delta X < 1.5$). Таким образом, в отличие от [6] в данной работе рассматривались в основном кристаллы с более универсальным ионным характером связи, основанном на кулоновском взаимодействии ионов. Помимо этого, для сравнения рассматривались кристаллы соединений неметалл–неметалл, для которых по данным [7] характерна связь ковалентного типа.

Основными задачами данной работы являлись исследование влияния параметров β_m и β_b на соответствующие значения энтропии плавления α_m и кипения α_b и установление связи между значениями α_m для кристалла и α_b для его расплава. Решение этих задач позволяет получить новые данные об особенностях энтропии плавления и кипения для рассмотренных типов кристаллов и расплавов, что актуально для практического использования и дальнейшего развития методов исследования плавления и кипения веществ.

Кроме того, для анализа специфики зависимостей α_m от β_m для ионных кристаллов при разной ионности связи I проводилась оценка влияния этой ионности на значения α_m и β_m .

Проводился также статистический анализ плотности локализации значений энтропии кипения в области ее минимальных значений. Для этого дополнительно рассматривались свыше 250 жидких углеводородов и жидких органических соединений.

Для ионных кристаллов с внешними электронными оболочками анионов типа инертных газов, в частности, для моногалогенидов щелочных металлов, ионность связи можно приближенно оценить из соотношения Полинга, приведенного в работе [7]:

$$I = 1 - \frac{v}{N} \exp\left(-\frac{\Delta X^2}{4}\right), \quad (6)$$

где v — валентность атомов металла в кристалле, N — координационное число в решетке кристалла. В соответствии с соотношением (6) ионность связи уменьшается с уменьшением ΔX и с ростом отношения v/N .

Для более широкого круга ионных кристаллов существует несколько эмпирических шкал ионности связи I_e , основанных, в основном, на оценках эффективных зарядов ионов в кристаллах. По данным работ [8, 9], значения ионности, соответствующие этим

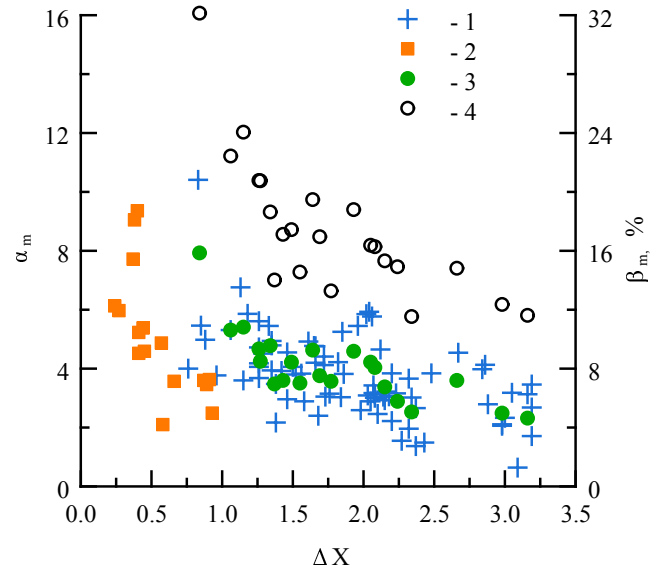


Рисунок 1. Влияние разности электроотрицательности атомов кристалла ΔX на энтропию плавления α_m : галогениды металлов — 1; полупроводниковые кристаллы типа $A^{II}B^{VI}$ — 2; а также влияние усредненных значений ΔX на усредненную энтропию плавления α_m — 3 и на нормированный усредненный параметр β_m для галогенидов металлов — 4 (нормировка β_m проводилась для более наглядного сопоставления значений α_m и β_m).

шкалам, заметно различаются между собой, особенно при малых ΔX (до 30% и более). Поэтому в данной работе в качестве приближенного индикатора ионности связи в кристаллах использовалось исходное значение ΔX , определяемое как разность электроотрицательностей атомов кристалла по Полингу, приведенных в [7].

Данные о температуре и теплоте фазовых переходов в кристаллах и расплавах заимствовались из [3, 4, 8, 10]. Данные же по T_b и E_b для жидких углеводородов брались из [11], а для органических жидкостей из [10].

2. ВЛИЯНИЕ РАЗНОСТИ ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОСТИ АТОМОВ В КРИСТАЛЛАХ НА ЭНТРОПИЮ ПЛАВЛЕНИЯ

Подробный анализ влияния электроотрицательности атомов на энтропию плавления проводился, в основном, для галогенидов металлов, для которых имеются достаточно обширные данные по параметрам плавления. Для сопоставления привлекались также данные для полупроводниковых кристаллов типа $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$. Полученные результаты приведены на рисунке 1.

Для рассмотренных галогенидов металлов значения v изменялись от 1 до 3, а N — от 4 до 10. В соответствии с (6) это приводило к разной ионности связи в разных кристаллах с одинаковыми величинами ΔX и к большому разбросу значений α_m на рисунке 1. Для снижения разброса величины α_m для разных кристаллов арифметически усреднялись в малом диапазоне

ΔX (от 0.1 до 0.3). Усреднялись и сами значения ΔX . Это позволяет более явно обнаружить характер влияния на энтропию плавления величины ΔX и ионности связи в кристалле.

В соответствии с данными на рисунке 1 в преимущественно ионной части химической связи, где расположена основная часть рассмотренных кристаллов, большинство значений α_m не превышают 6, а значений β_m — 20–30%. Значения α_m и β_m , в целом, уменьшаются с ростом ΔX . В ионно-ковалентной части связи наблюдаются повышенные значения α_m (до 10) и β_m (до 40%), а также более высокий разброс значений α_m и β_m .

Отметим также, что убывающие зависимости α_m и β_m от ΔX , в целом подобны между собой. Это указывает на то, что в основе влияния β_m на α_m , проиллюстрированном на последующих рисунках, лежит влияние ΔX или ионности связи. Универсальный характер ионной связи обуславливает сравнительно слабое влияние состава или типа ионного соединения на зависимости α_m от β_m . В отличие от этого по данным [6] зависимости α_m от β_m для разных типов простых веществ существенно различаются.

Подобный характер зависимости α_m от ΔX наблюдается и для оксидов металлов, а для соединений неметаллов с другим типом связи энтропия α_m практически не зависит от ΔX .

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ ОБ ЭНТРОПИИ ПЛАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ И КИПЕНИЯ ИХ РАСПЛАВОВ

На рисунке 2 приведены зависимости энтропии плавления α_m от параметра β_m для разных кристаллов. Как видно из этого рисунка, в области преимущественно ионной связи, соответствующей значениям $\alpha_m < 6$ и $\beta_m < 30\%$, находятся большинство галогенидов и оксидов металлов (свыше 80%) и для всех типов кристаллов с учетом погрешности и разброса данных справедлива линейная зависимость α_m от β_m ($\alpha_m = A \times \beta_m$). При этом коэффициент пропорциональности в этой аппроксимации A сравнительно слабо зависит от типа кристалла.

Для оксидов металлов по сравнению с галогенидами наблюдается более высокий разброс значений α_m . Этот разброс в значительной степени связан с тем, что в отличие от галогенидов для оксидов металлов рост валентности атомов металла v при данном β_m приводит к некоторому росту α_m .

В итоге коэффициент в линейной аппроксимации зависимости α_m от β_m возрастает от 0.2 для основных оксидов ($v = 1$ и 2), до 0.23 для амфотерных оксидов ($v = 3$ и 4) и до 0.3 для кислотных оксидов с $v > 4$. Без сортировки по v среднее значение A для оксидов металлов соответствует значениям для галогенидов металлов, что можно объяснить сходными значениями параметров ионной связи в эти кристаллах.

Следует также учесть, что ряд оксидов, особенно, переходных металлов, являются полупроводниками. По данным [3, 4] для таких кристаллов при плавлении наблюдается переход типа полупроводник–металл, изменяющий тип химической связи в кристалле, что увеличивает электронную составляющую энтропии плавления α_{em} и само значение α_m . Исходя из принципа аддитивности суммарной энтропии плавления [1, 3], а так-

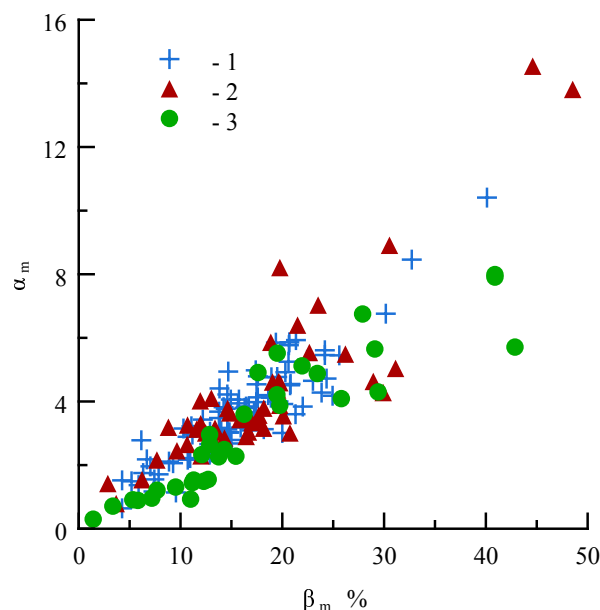


Рисунок 2. Зависимость энтропии плавления α_m от параметра β_m : галогениды металлов — 1; оксиды металлов — 2; соединения неметаллов — 3.

же учитывая данные [4] и наши результаты [6], о величине α_{em} можно судить по разности суммарной энтропии α_{m1} при данном β_m для полупроводникового кристалла и суммарной энтропии α_{m2} для непроводникового кристалла того же типа (при нулевом или малом значении α_{em}). При этом энтропия α_{m2} при данном β_m является усредненной, поскольку определяется из аппроксимации зависимости α_{m2} от β_m . Оцененные таким образом значения α_{em} для кристаллов Te_2O_7 , V_2O_5 , Re_2O_7 и Mn_2O_4 равны соответственно 4.3, 3.6, 2.7 и 1.9. Отметим, что по аналитическим оценкам [4] для полупроводниковых кристаллов типа $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ значения α_{em} изменяются от 1 до 2.5.

Полученные данные по энтропии кипения расплавов представлены на рисунке 3. По этим данным большинство расплавов имеют значения $\beta_b > 70\%$, что соответствует значениям $\beta_m < 30\%$.

Как следует из данных на рисунке 3, энтропия кипения в среднем увеличивается с ростом β_b , но, как и для расплавов простых веществ в [6], наблюдается большой разброс значений α_b при данном β_b . Как показано в [6], этот различие можно объяснить дополнительным влиянием на α_b приведенной температуры кипения в НТК $\mu = T_b/T_{cr}$, где T_{cr} — критическая температура расплава. Как следует из термодинамического принципа соответственных состояний [12, 13], при увеличении μ энтропия кипения уменьшается, достигая нулевого значения при $\mu = 1$. Таким образом, разные значения μ в НТК для разных расплавов должны приводить к разным значениям α_b .

Существенно, что за очень редким исключением для рассмотренных расплавов на рисунке 3 четко фиксируется минимальный уровень энтропии кипения $\alpha_b^* = 10$, который соответствует известному правилу Трутона [12, 13], полученному из анализа α_b

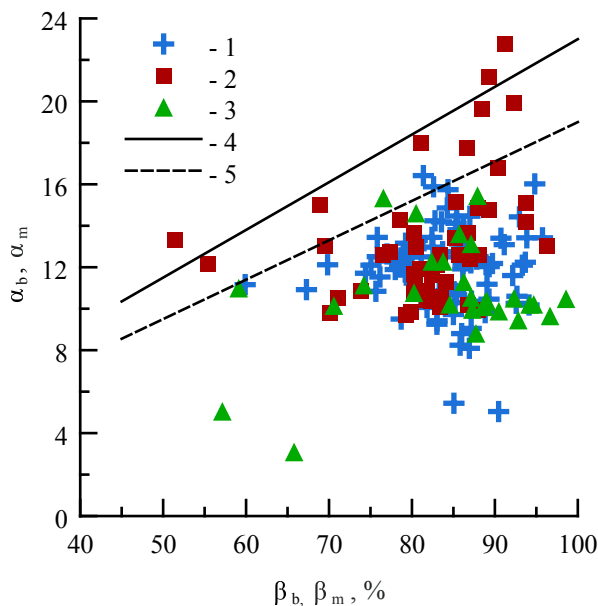


Рисунок 3. Зависимость энтропии кипения от параметра β_b : галогениды металлов — 1; оксиды металлов — 2; соединения неметаллов — 3. Экстраполяция линейной зависимости α_m от β_m в область кипения для оксидов металлов — 4 и для соединений неметаллов — 5.

для органических жидкостей со сравнительно низкими температурами кипения (менее $\sim 10^3$ К). При наличии фиксированных минимальных α_b рост средней энтропии кипения с увеличением β_b для данных на рисунке 3 обеспечивается соответствующим увеличением максимальных α_b .

Интересно, что на качественном уровне темп роста этих максимальных α_b с увеличением β_b коррелирует с темпом роста α_m с увеличением β_m , экстраполированным в область плавления и характеризуемым коэффициентом A в линейной зависимости $\alpha_m = A \times \beta_m$.

Отметим также, что по данным [6] для кристаллов простых веществ наличие минимальных значений α_b на уровне $\alpha_b^* = 10$ достаточно отчетливо не проявляется.

Для пояснения диапазона изменения α_b в кристаллах на рисунке 4 представлены зависимости теплоты кипения от температуры кипения для разных веществ, которые сопоставлены с тремя линиями постоянных значений энтропии кипения α_b , определяемые по выражению $E_b = \alpha_b R T_b$, следующему из (3).

Судя по расположению данных E_b по отношению к линиям постоянной энтропии на рисунке 4, во всей области T_b для галогенидов металлов отчетливо проявляется минимальный уровень E_b , соответствующий минимальному уровню $\alpha_b = 10$, а максимальный уровень E_b соответствует $\alpha_b = 16$.

Для оксидов металлов с более высокими T_b уровень минимальных E_b и соответствующих $\alpha_b = 10$ реализуется при $T_b < 4 \times 10^3$ К. Однако при $T_b > 3 \times 10^3$ К появляются и высокоэнтропийные оксиды со средним значением $\alpha_b = 20$. В этой области T_b энтропия кипения металлов, приведенная для сравнения, в среднем близка к 15.

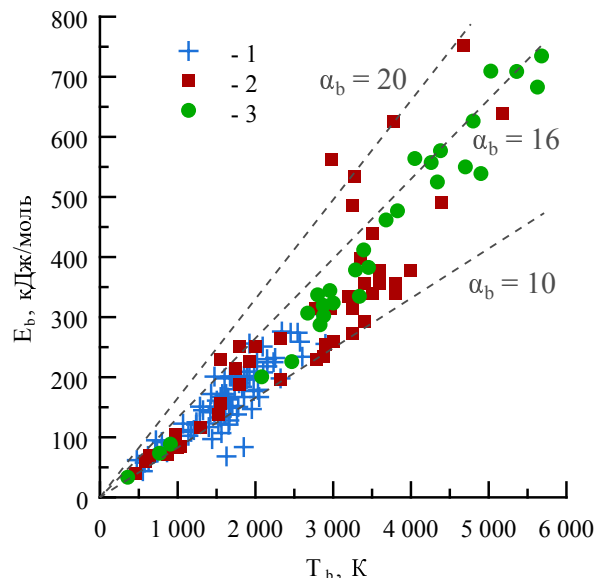


Рисунок 4. Зависимость теплоты кипения E_b от температуры кипения T_b : галогениды металлов — 1; оксиды металлов — 2; переходные металлы с валентными d-электронами — 3. Линии постоянной энтропии кипения $\alpha_b = 10$ — 4, $\alpha_b = 16$ — 5 и $\alpha_b = 20$ — 6.

4. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ЭНТРОПИИ КИПЕНИЯ

Для анализа особенностей распределения α_b для разных по составу жидкостей вблизи уровня минимальных значений $\alpha_b^* = 10$ был произведен статистический анализ данных по энтропии кипения, аналогичный анализу интегральной вероятности случайных величин из [14]. Для этого во всем реализованном диапазоне α_b вычислялась интегральная плотность локализации значений $\alpha_b = \rho$, равная числу жидкостей, имеющих величины α_b меньше заданного значения, отнесенному к общему числу жидкостей. В этом случае разность значений ρ в конечной и начальной точке интервала α_{b1} и α_{b2} ($\alpha_{b2} < \alpha_{b1}$) дает локальную плотность локализации энтропии α_b в указанном интервале. При анализе определялись локальные значения ρ для интервала α_b от 9.3 до 10.7, аналогичном тому интервалу α_b , который использовался в работе [13] для ряда органических жидкостей.

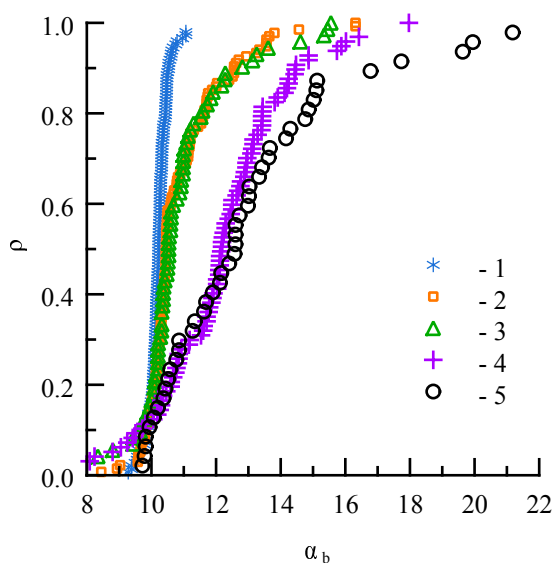
На рисунке 5 приведены полученные зависимости интегральной плотности локализации ρ от энтропии кипения для пяти типов жидкостей, а в таблице 1 даны некоторые численные результаты.

В соответствии с данными на рисунке 5 по виду зависимости ρ от α_b можно выделить 3 группы жидкостей: углеводороды с максимальными ρ , органические жидкости и соединения неметаллов со средними ρ , а также галогениды и оксиды металлов с минимальными ρ . Подобным образом изменяются и локальные значения ρ в таблице 1: от 0.96 для первой группы, до 0.6 — для второй и до 0.2 — для третьей.

Таким образом, для пяти рассмотренных типов жидкостей разного состава наблюдается в среднем

Таблица 1. Данные по интегральным и локальным значениям плотности локализации ρ для энтропии кипения α_b различных жидкостей.

Наименование	Углеводороды	Органические жидкости	Соединения неметаллов	Галогениды металлов	Оксиды металлов
Интегральное значение ρ для $\alpha_b < 10$	0.17	0.15	0.17	0.12	0.13
Интегральное значение ρ для $\alpha_b < 10.7$	0.98	0.62	0.59	0.23	0.25
Локальное значение ρ для интервала $9.3 < \alpha_b < 10.7$	0.96	0.6	0.6	0.2	0.2
Среднее значение α_b	10.2	11.1	10.8	12.2	12.4
Объем выборки	145	135	73	95	49

**Рисунок 5.** Зависимость интегрального коэффициента локализации энтропии ρ от энтропии кипения α_b : углеводороды — 1; другие органические жидкости — 2; соединения неметаллов — 3; галогениды металлов — 4; оксиды металлов — 5.

одинаковый минимальный уровень энтропии кипения $\alpha_b = 10$. Однако значения интегральной и локальной плотности локализации энтропии α_b для разных типов жидкостей существенно (до 5 раз) различаются между собой. В этой связи отметим, что рассмотренные коэффициенты локализации можно использовать, как один из критериев применимости правила Трутона для оценки α_b данного типа жидкости.

5. СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭНТРОПИЕЙ ПЛАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛА И ЭНТРОПИЕЙ КИПЕНИЯ ЕГО РАСПЛАВА

Как уже отмечалось, в соответствии с (5) увеличение β_m при плавлении кристалла сопровождается уменьшением β_b при кипении его расплава. При наличии возрастающих зависимостей α_m от β_m и α_b от β_b это приводит к росту отношения α_m/α_b при увеличении β_m , которое представлено на рисунке 6.

По данным на рисунке 6 зависимость отношения α_m/α_b от β_m близка к линейной с коэффициентом пропорциональности, близким к 0.02. По этой аппроксимации при равных предельных значениях $\beta_m = \beta_b = 50\%$ получается отношение α_m/α_b , близкое к 1, то есть почти равные значения минимальной энтропии кипения расплава и максимальной энтропии плавления его кристалла.

Отметим, что и для рассмотренных в [6] кристаллов простых веществ отношение α_m/α_b также увеличивается с ростом β_m . Но эти возрастающие зависимости существенно зависят от типа межатомной связи в кристаллах. По данным [6] для простых веществ характерны меньшие максимальные значения β_m (до 10% — для металлов, до 15% — для неметаллов и до 25% — для полупроводников и металлоидов). Это обуславливает меньшие отношения α_m/α_b для этих веществ (до 0.15–0.2 для металлов и неметаллов).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для бинарных ионных галогенидов, оксидов металлов и для бинарных соединений неметаллов получены зависимости безразмерной, отнесенной к молярной газовой постоянной, энтропии плавления кристаллов α_m и энтропии кипения их расплавов в нормальной точке кипения α_b от соответствующих энергетических параметров β_m и β_b , равных теплоте плавления или кипения, отнесенной к сумме этих теплот.

Применительно к плавлению кристаллов показано, что:

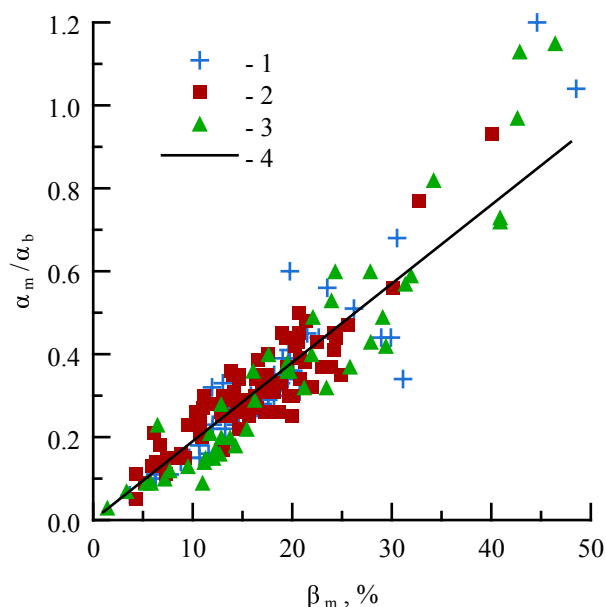


Рисунок 6. Отношение энтропии плавления кристалла к энтропии кипения его расплава α_m/α_b в зависимости от параметра β_m : галогениды металлов — 1, оксиды металлов — 2, соединений неметаллов — 3, аппроксимация зависимости α_m/α_b от β_m при $\beta_m < 30\%$ без разделения α_b на типы соединений — 4.

- уменьшение степени ионности связи в ионных кристаллах, вызванное уменьшением разности электроотрицательности атомов кристалла ΔX , приводит к взаимосвязанному росту величин β_m и α_m ;
- влияние β_m на α_m в кристаллах в значительной степени определяется ионностью связи в кристалле;
- в области преимущественно ионной связи (при $\Delta X > 1.5$) фиксируются прямо пропорциональные зависимости $\alpha_m = A \times \beta_m$ с коэффициентом пропорциональности A , изменяющимся для разных типов кристаллов от 0.2 до 0.3; сравнительно малая вариация коэффициента A для разных типов кристаллов может объясняться универсальным характером ионной связи, основанной на кулоновском взаимодействии ионов;
- в области менее универсальной ионно-ковалентной связи (при $\Delta X < 1.5$) характерны повышенный разброс данных, а также повышенные значения β_m (до 50%) и α_m (до 10).

Энтропия кипения расплавов или жидкостей в среднем увеличивается с ростом параметра β_b , но наблюдается большое различие энтропии при данном β_b для разных расплавов, которое можно объяснить разными значениями отношения температуры кипения в нормальной точке кипения к критической температуре.

Для рассмотренных расплавов или жидкостей наблюдается в целом одинаковый уровень минимальной энтропии кипения $\alpha_b^* = 10$, который соответствует энтропии кипения, полученной по известному правилу Трутона для органических жидкостей.

С использованием статистического анализа оценена плотность локализации ρ энтропии кипения вблизи ее минимальных значений (в интервале от 9.3 до 10.7). Полученные значения ρ изменяются от 96% для жидких углеводородов, до 60% для органических жидкостей и соединений неметаллов, и до 20% для галогенидов и оксидов металлов. Введенную плотность локализации можно использовать как один из критериев применимости правила Трутона для оценки α_b для данного типа жидкости.

Отношение энтропии плавления кристалла к энтропии кипения его расплава увеличивается с ростом параметра β_m и для некоторых соединений (например, Re_2O_7 и Tc_2O_7) достигает значения, близкого к единице, в области приближенного равенства β_m и β_b (около 50%), что приводит к приближительному равенству максимального α_m (около 10) для данного кристалла и минимального значения α_b для его расплава.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.Я. Бронину за внимание к работе и полезные замечания.

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075–00269–25–00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Убеллоде А 1969 *Плавление и кристаллическая структура* (Москва: Мир)
2. Стишов С М 1974 *Успехи физических наук* **114** 3–40
3. Глазов В М и Айвазов А А 1980 *Энтропия плавления металлов и полупроводников* (Москва: Металлургия)
4. Регель А П и Глазов В М 1995 *Физика и техника полупроводников* **29** 780–805
5. Скрипов В П и Файзуллин М З 1999 *ТВТ* **37** 814–829
6. Ярцев И М, Полищук В П и Усманов Р А 2024 *Вестник ОИВТ РАН* **15** 23–28
7. Урусов В С 1987 *Теоретическая кристаллохимия* (Москва: МГУ)
8. Бацанов С С 2000 *Структурная химия (факты и зависимости)* (Москва: Диалог-МГУ)
9. Пахомов Е П и Ярцев И М 2022 *Прикладная физика* **5** 67–74
10. Кикоин И К 1976 *Справочник физических величин* (Москва: Атомиздат)
11. Татевский В М 1960 *Физико-химические свойства индивидуальных углеводов* (Москва: Гостоптехиздат)
12. Путилов К А 2013 *Курс физики* (Москва: Рипол Классик)
13. Карапетьянц М Х 1975 *Химическая термодинамика* (Москва: Химия)
14. Пустыльник Е И 1968 *Статистические методы анализа и обработки наблюдений* (Москва: Наука)