

Журнал издается 64 года (с 1951 г.)

Издатель: ОАО «ГИПРОЦВЕТМЕТ»
Генеральный директор
ПОПОВ Роман Владимирович

Председатель редакционного совета:
докт. техн. наук, проф.
ТАРАСОВ Андрей Владимирович

Члены редакционного совета:

Е.Ю. Быховская (ОАО «Институт «Гинцветмет»)
Э.И. Гедгагов (ОАО «Институт «Гинцветмет»)
В.И. Голик (Северо-Кавказский горно-металлургический институт государственного технического университета, г. Владикавказ)
М.Э. Данисов (ОАО «Гипроцветмет»)
А.А. Дмитриев (КОО «Предприятие Эрдэнэт», Монголия)
И.И. Егоров (ОАО «Гипроцветмет»)
А.И. Едильбаев (ТОО «Горно-Республика Казахстан»)
Ф.Д. Ларичкин (Институт экономических проблем КНЦ РАН, г. Апатиты)
А.В. Маслов (ОАО «Зарубежгеология»)
В.М. Парезкин (ОАО «Институт «Гинцветмет»)
И.Л. Демидов (ОАО «Гипроцветмет»)
Ю.Н. Райков (ОАО «Институт Цветметобработка»)
Б.П. Руднев (ОАО «Гипроцветмет»)
Е.Н. Селиванов (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
Е.М. Сизяков (Национальный минерально-сырьевой университет «Орбис», г. Санкт-Петербург)
А.В. Тарасов (ОАО «Институт «Гинцветмет»)
А.Д. Толстогузов (ООО «Гинцветмет»)
А.П. Фоменко (КОО «Предприятие Эрдэнэт», Монголия)
А.М. Халемский (ООО «Фортко-УПЕК»)
В.П. Цывьян (ОАО «Оспан-инновации»)
Д.Г. Шанаурин (ГК «ШАНЕКО»)

Редакция:

Главный редактор
ТАРАСОВ Андрей Владимирович

Зам. главного редактора
ЕГОРОВ Игорь Николаевич

Научный редактор
ЗАЗУЛИНА Зоя Константиновна

Дизайн и верстка
ИВАНЬШИНА Ирина Геннадьевна

Адрес: 129515, Москва, а/я № 51 – «ГИПРОЦВЕТМЕТ» – МВ,
ул. Академика Королёва, д. 13, стр. 1, оф. 607

Тел./факс: (495) 616-95-55
Тел.: (495) 600-32-00 доб. 14-19
E-mail: zvetmet-info@mail.ru; office@giproctm.ru
http://www.giproctm.ru

Выходит 6 номеров в год.

Отпечатано в типографии «ПЦ-Центр»
Формат А4; тираж 499 экз.

Подписано в печать: 28.12.2015.
Индекс в каталоге агентства Роспечать 81090.
В течение года можно оформить подписку на журнал
через редакцию.

За точность приведенных сведений и содержание данных,
не поддающихся объективной публикации, ответственность
несут авторы.
Мнения авторов могут не совпадать с мнением редакции.
Рукописи не возвращаются.
Фото с сайта: <http://www.metalinfo.ru/>

© ОАО «ГИПРОЦВЕТМЕТ»

ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 6, октябрь – декабрь 2015 г.

Учредители:

ОАО «ГИПРОЦВЕТМЕТ»,
ОАО «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ»

Журнал включен в Реферативный журнал
и Базы данных ВИНТИ

Ростех

“ООО «РТ-Глобальные ресурсы» (РТГР) – локомотив восстановления промышленности России”

СОДЕРЖАНИЕ

21-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА «МЕТАЛЛ-ЭКСПО'2015»

«Металл-Экспо'2015» показала: российская промышленность не остановилась, а развивается 7

И.Л. Демидов, Е.Ю. Быховская

Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов 14

МИНЕРАЛЬНО–СЫРЬЕВАЯ БАЗА

А.В. Логачев

Обоснование границ эффективного применения комбинирования геотехнологий при разработке месторождения 16

М.А. Найманбаев, Н.Г. Лохова, Ж.А. Балтабекова

Анализ современного состояния сырьевой базы вольфрама в Казахстане 20

ГОРНОЕ ДЕЛО

В.И. Ляшенко, П.А. Кислый, В.З. Дятчин, Б.П. Кислый

Экологической безопасности горного производства – надежное технологическое и техническое обеспечение 23

В.И. Голик, Т.Г. Хетагурова, Т.Г. Шелкунова, Э.К. Чельдиева

К проблеме выживания горных предприятий в условиях изменения экономической системы 32

МЕТАЛЛУРГИЯ

И.М. Петров

Тенденции производства и потребления порошков цветных металлов в России 40

В.А. Имидеев, А.С. Медведев, П.В. Александров

Низкотемпературный хлорирующий обжиг сульфидных никелевых концентратов 44

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.А. Лапшин, В.И. Ляшенко

Улучшение микроклимата глубоких шахт при камерных системах разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства 46

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ

А.Ш. Кажикенова, Д.Б. Алибиев, А.М. Макашева, Б.К. Абенов

Математическая модель температурной зависимости вязкости бария по концепции хаотизированных частиц 56

РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А.А. Гасанов, А.В. Наумов

Современное состояние мирового рынка мышьяка и его соединений 61

НЕ СТАЛО СТАНИСЛАВА НИКОЛАЕВИЧА ПОДВИШЕНСКОГО 71

ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ

УДК 669+54-142

Математическая модель температурной зависимости вязкости бария по концепции хаотизированных частиц

А.Ш. Кажикенова, Д.Б. Алибиев,

(Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова, Республика Казахстан),

А.М. Макашева

(Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Республика Казахстан),

Б.К. Абенов

(Казахский национальный университет им. Аль-Фараби)

Введение

Для аналитического описания агрегатных состояний жидкое состояние является наиболее сложным. В свою очередь, из различных физико-химических свойств расплавов наиболее трудным для формализации на основе фундаментальных характеристик вещества оказывается вязкость. Многие авторы при изучении жидкого металлического состояния среди большого разнообразия моделей жидкости предпочтение отдают тем, которые опираются на концепцию квазикристаллического описания.

Существующие закономерности и расчетные формулы вязкости, основанные на подробном описании структуры и взаимодействия между частицами в структуре расплавов металлов, работают в узком диапазоне температур, содержат от двух и более подгоночных параметров, лишенных физического смысла. Данные по вязкости, полученные в ходе различных исследований или расчетом по различным теориям, часто отличаются на несколько порядков. Все это указывает на необходимость дополнительных разработок на основе альтернативных подходов к пониманию вязкости. В настоящее время учеными установ-

лено, что отдельные изменения физических свойств можно рассматривать с точки зрения подчинения распределению Больцмана.

Основная часть

На основе данного распределения сотрудниками Химико-металлургического института им. Ж. Абишева (г. Караганда, Республика Казахстан) была разработана концепция хаотизированных частиц [1]. Этой концепцией устанавливается виртуальное присутствие кристаллоподвижных, жидкоподвижных и пароподвижных частиц во всем температурном диапазоне для всех агрегатных состояний вещества. Свойства этих частиц проявляются только статистически в прямом подчинении распределению Больцмана по кинетической энергии хаотического теплового движения.

В результате исследований ими было установлено, что зависимость вязкости расплавов от температуры может быть выражена с точки зрения концепции хаотизированных частиц следующими уравнениями [2]:

• с учетом только кристаллоподвижных частиц:

$$\nu = \nu_{\text{крп}} T_{\text{крп}} / T, \quad (1)$$

• с учетом кристаллоподвижных и разжижающего действия доли жидкоподвижных частиц:

$$v = \frac{v_{\text{реп}} T_{\text{реп}} \left[\exp(-T_{\text{пл}} / T_{\text{реп}}) - \exp(-T_{\text{кип}} / T_{\text{реп}}) \right]}{T \left[\exp(-T_{\text{пл}} / T) - \exp(-T_{\text{кип}} / T) \right]}, \quad (2)$$

где $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{кип}}$ — температура соответственно плавления и кипения;

• с учетом ослабляющего действия пароподвижных частиц:

$$v = \frac{v_{\text{реп}} T_{\text{реп}} \exp(-T_{\text{пл}} / T_{\text{реп}})}{T \exp(-T_{\text{пл}} / T)} = \frac{v_{\text{реп}} T_{\text{реп}}}{T} \exp\left(\frac{T_{\text{пл}}}{T} - \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{реп}}}\right). \quad (3)$$

где $v_{\text{реп}}$ и $T_{\text{реп}}$ — соответственно кинематическая вязкость и абсолютная температура для некоторой реперной точки, которая выбирается произвольно в качестве наиболее надежного экспериментального значения.

Реперную точку целесообразно фиксировать вблизи (а не в точке) кристаллизации, так как при пониженных температурах вязкость определяется более надежно и имеет высокие значения. В самой же точке кристаллизации из-за возможного присутствия неопределенного количества равновесной твердой фазы вязкость эмульсии будет завышенной против вязкости чисто жидкого состояния.

Предложенные уравнения следует рассматривать в качестве альтернативы к существующим моделям температурной зависимости вязкости расплавов. Эти модели были проверены на всем доступном справочном материале по вязкости расплавов металлов [3]. В результате проверки было установлено соответствие справочных данных какой-либо из трех предложенных моделей; к тому же эта подчиненность оказалась в согласии с различием в конфигурациях электронных оболочек и потенциалами ионизации металлов, т.е. с Периодическим законом Д.И. Менделеева.

Необходимость проверки каждой из трех моделей вязкости и выбора из них наиболее адекватной усложняет процедуру обработки данных. Это заставило авторов более детально рассмотреть природу жидкого состояния, оставаясь в рамках концепции хаотизированных частиц. В данной работе предлагается обобщенная модель зависимости вязкости от температуры с учетом степени ассоциации кластеров.

Согласно нашему предположению, более сильная зависимость от температуры может быть объяснена образованием *ассоциированных кластеров*, разрушение которых с повышением температуры происходит параллельно с разрушением элементарных кластеров, что и создаст эффект более сильного влияния температуры на вязкость. Поэтому считаем, что необходимо усилить фрагмент $(T_{\text{реп}}/T)$ путем возведения вероятности элементарного события в степень, равную числу соударяющихся частиц:

$$v = v_{\text{реп}} (T_{\text{реп}}/T)^a. \quad (4)$$

В этой зависимости показатель a имеет смысл степени ассоциации \bar{n} -частичных кластеров. В результате исследования установлено, что любая более сильная зависимость от температуры может быть выражена по (4) с $a > 1$.

Параметр a определяем из (4) путем логарифмирования:

$$a = \frac{\ln(v/v_{\text{реп}})}{\ln(T_{\text{реп}}/T)}. \quad (5)$$

Для определения a были использованы все экспериментальные значения вязкости при различных температурах, за исключением значений $v_{\text{реп}}$, $T_{\text{реп}}$, приводящих к неопределенности вида $[0/0]$, с последующим его усреднением:

$$\bar{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\ln(v_i/v_{\text{реп}})}{\ln(T_{\text{реп}}/T_i)}, \quad (6)$$

Сопоставление экспериментальных данных [4] с рассчитанными по моделям (1)–(4) значениями кинематической вязкости серебра, $\nu \cdot 10^7$, м²/с

T	ν (эксп)	ν (1)	ν (2)	ν (3)	a	ν (4)
$T_{пл} = 983$	–	4,982	5,134	5,418	–	5,234
1073	4,564	4,564	4,564	4,564	–	4,564
1173	3,901	4,175	4,089	3,861	1,762	3,971
1373	3,067	3,567	3,440	2,920	1,612	3,105
1473	2,793	3,325	3,210	2,592	1,550	2,782
1573	2,577	3,113	3,022	2,327	1,494	2,510
1773	2,264	2,762	2,732	1,924	1,396	2,082
$T_{кип} = 1913$	–	2,560	2,578	1,712	–	1,849
\bar{a}	–	0,789	0,865	0,959	–	0,993

где i – переменная суммирования; m – количество вычисленных по формуле (5) значений параметра a .

Предлагая обобщенная модель температурной зависимости вязкости была использована нами для расчета энергии активации вязкого течения расплава в комбинации с уравнением Френкеля, которое выведено для динамической вязкости:

$$\eta = A \exp\left(\frac{U}{RT}\right), \quad (7)$$

где A и U – соответственно постоянные предэкспоненциальный множитель и энергия активации вязкого течения.

Кинематическая вязкость связана с динамической вязкостью формулой: $\nu = \eta/\rho$, где ρ – плотность расплава.

Учитывая слабую зависимость плотности от температуры [4], в уравнении (7) η можно напрямую заменить на ν , соответственно скорректировав параметры A и U на A' и E_a . Получим уравнение:

$$\nu = A' \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right). \quad (8)$$

Уравнение (7) справедливо для узкого диапазона температур и непригодно для полного описания жидкого состояния. Поэтому появляется необходимость представления обобщенной зависимости (4) в координатах

$\ln \nu - 1/T$ для выделения псевдопрямойных участков с целью обработки их по модифицированному уравнению Френкеля (8) и определения величины энергии активации разуплотнения и вязкого течения.

Покажем применимость предлагаемой модели к расплаву бария.

По барию в справочнике [5] указаны температуры плавления и кипения: $T_{пл} = 983$ К и $T_{кип} = 1913$ К, данные по вязкости отсутствуют. В монографии [4] со ссылкой на первоисточник [6] приводятся сглаженные экспериментальные данные по кинематической вязкости бария. Для сопоставления экспериментальных данных с расчетными выбрана реперная точка вблизи температуры плавления $T_{реп} = 1073$ К и $\nu_{реп} = 4,564 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Сопоставление экспериментальных данных с рассчитанными по моделям (1)–(4) приведено в таблице и на рис. 1.

Из таблицы и рис. 1 видно, что модель (4) описывает температурную зависимость вязкости наилучшим образом по сравнению с моделью (3), которая ранее считалась наиболее адекватной [3]. Для модели (3) коэффициент корреляции равен 0,959, для предлагаемой модели – 0,993. Как видно, коэффициент корреляции модели (4) выше, поэтому для описания температурной зависимости целесообразно применить обобщенную модель.

Среднее значение $\bar{a} = 1,56$. Однородность множества для a по критерию

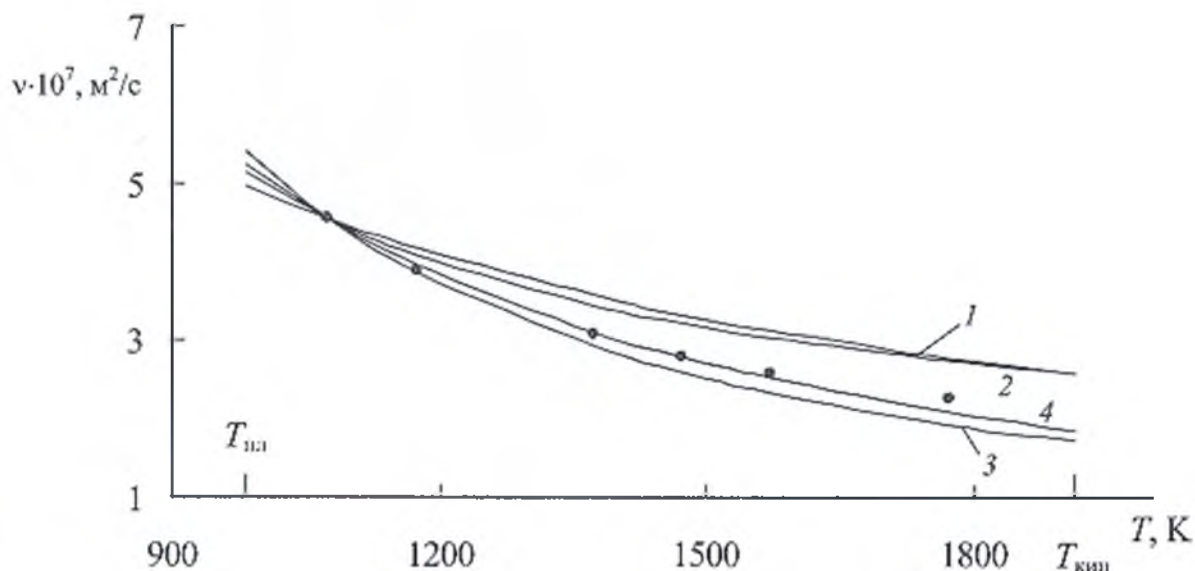


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости бария от температуры:

1 – по модели (1); 2 – по модели (2); 3 – по модели (3); 4 – по модели (4). Точки – экспериментальные данные [4]

Налимова соблюдается: $S(x) = 0,137$;
 $r_{\min} = 1,365 < r_{cr} = 1,821$.

С учетом степени ассоциации кластеров в качестве обобщенной модели вязкости расплавов в полном диапазоне температур можно использовать модель (4) с реперной точкой вблизи температуры плавления $T_{\text{реп}} = 1073$ К. Расчетная формула кинематической вязкости бария с нахождением доверительного интервала и округлением выглядит следующим образом:

$$\nu = (0,0249 / T^{1,56}) \pm 1,68 \cdot 10^{-9} \text{ (м}^2\text{/с)}. \quad (9)$$

Экспериментальные [4] и рассчитанные по обобщенной модели (4) данные для температурной зависимости кинематической вязкости были обработаны по модифицированному уравнению Френкеля (8).

В рассматриваемом интервале температур по уравнению (8) рассчитана энергия активации

для $E_a = 15\,889$ Дж/моль, а для предлагаемой модели – $E'_a = 17\,543$ Дж/моль. Зависимость логарифма кинематической вязкости бария от обратной температуры приведена на рис. 2.

Предлагаемая модель была проверена на 28-и металлах [7], для которых имеются справочные данные по вязкости [6]. Во всех случаях обобщенная модель (4) описывает температурную зависимость вязкости более адекватно в сравнении с выбранной из ранее трех предлагаемых моделей.

Выводы

Для вязкости на основе концепции хаотизированных частиц создается возможность определить с удовлетворительной точностью ее температурную зависимость в полном диапазоне жидкого состояния по единой модели, учитывающей степень ассоциации элементарных кластеров и динамически существующих кристаллоподвижных частиц.

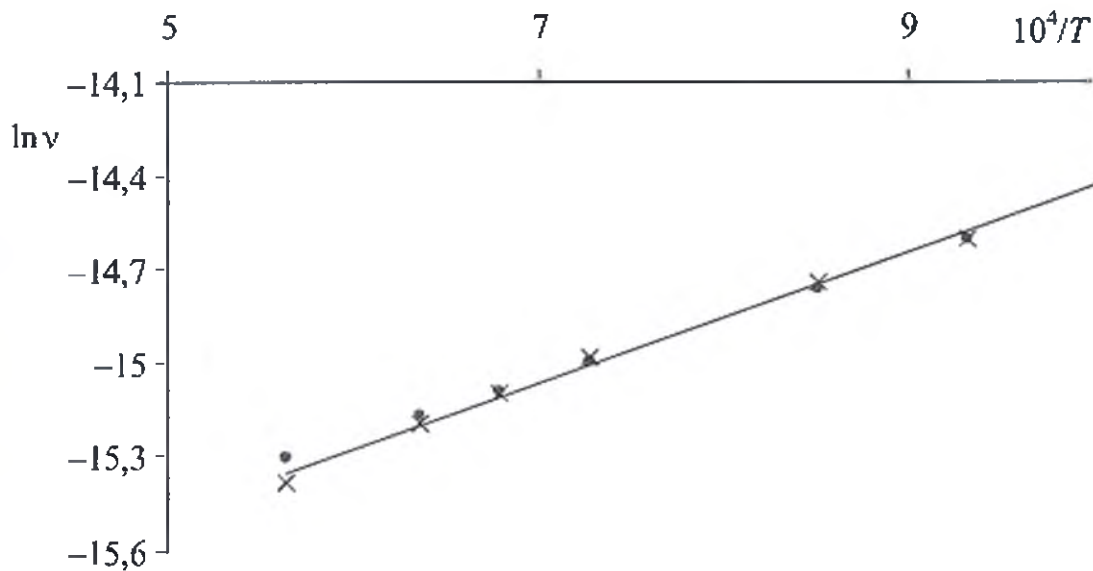


Рис. 2. Зависимость логарифма кинематической вязкости бария от обратной температуры: крестики – для модели (9), прямая – по уравнению $\ln \nu = \ln A' + E' / (RT)$; точки – экспериментальные данные

Список литературы

1. Малышев В.П., Турдукожаева А.М., Кажикенова А.Ш. Вязкость расплавов металлов по концепции хаотизированных частиц // Тяжелое машиностроение. 2009. № 6. С. 37–39.
2. Малышев В.П., Нурмагамбетова А.М. Зависимость вязкости расплавов от температуры на основе концепции хаотизированных частиц // Тез. докл. XV междунар. конф. по хим. термодинамике в России. – М., 2005. – С. 197.
3. Турдукожаева А.М. Применение распределения Больцмана и информационной энтропии Шеннона к анализу твердого, жидкого и газообразного состояний вещества (на примере металлов): автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.16.08. – Караганда: ХМИ, 2008. – 32 с.
4. Исследование вязкости жидких металлов / Э.Э. Шпильрайн, В.А. Фомин, С.Н. Сквородько, Т.Ф. Сокол. – М.: Наука, 1983. – 244 с.
5. Свойства элементов: Справ. изд. – В 2-х кн. / Под ред. Дрица М.Е. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2003. – Кн. 1. – 448 с.
6. Shpilrain E. E., Fomin V. A., Kagan D. N., Sokol G.F. et al. Thermo physical properties of liquid barium // High Temp-High Press. 1977. Vol. 9. P. 45–56.
7. Кажикенова А.Ш. Разработка обобщенной полуэмпирической модели вязкости жидких металлов на основе концепции хаотизированных частиц с учетом степени ассоциированности кластеров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.08. – Караганда: ХМИ, 2010. – 21 с.