

# Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

S. N. Skovorod'ko, A. G. Mozgovoi, The solubility of inert gases in heavy liquid-metal heat-transfer agents at high temperatures, *TVT*, 2010, Volume 48, Issue 4, 633–636

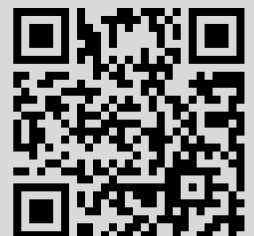
Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.168

March 26, 2025, 07:06:38



слоя окисла палладия в накоплении энергии атомами дейтерия.

В таблице приведены данные экспериментального исследования выхода дейтронов в зависимости от параметров мишени. Методика и техника эксперимента аналогичны тем, что описаны в работе [1].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, поглощение энергии внешнего воздействия, а также энергия дейтронов при их десорбции из палладия, обогащенного водородом, зависит от микрофизических параметров элементов системы, ее размеров и структуры, что является определяющим при реализации процессов, сопровождающих десорбцию дейтерия. Увеличение энергии обеспечивается многократным рассеянием возмущения в виде плазмонов и осцилляций электронной плотности, распространяющихся по всей среде при внешнем воздействии электронами.

УДК 542.61:541.428–13

## РАСТВОРИМОСТЬ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ В ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2010 г. С. Н. Сковородько, А. Г. Мозговой

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступило в редакцию 03.07.2009 г.

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии со стратегией развития атомной энергетики России в первой половине XXI века, разрабатываемой в настоящее время совместно Росатомом РФ и Российской академией наук, ядерным реакторам на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в своем первом контуре придается важная роль в структуре энергообеспечения страны. Наиболее перспективными теплоносителями для них считаются, кроме натрия, такие тяжелые металлы, как олово, свинец и висмут и их взаимные двойные сплавы эвтектического состава. Для оптимального выбора тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) проектировщики и разработчики быстрых реакторов того или иного типа должны иметь на руках надежные и высокоточные сведения об их физико-химических и технологических характеристиках при технических важных температурах. Естественно, что расчет-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липсон А.Г., Чернов И.П., Русецкий А.С. и др. Десорбция "горячих" атомов дейтерия из гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> при возбуждении ее водородной подсистемы // Докл. РАН. 2009. Т. 425. № 5. С. 1.
2. Tyurin Yu.I., Chernov I.P. Non-Equilibrium Release of Atomic Hydrogen from Metal under Irradiation // Int. J. Hydrogen Energy. 2002. V. 27. P. 829.
3. Чернов И.П., Коротеев В.М., Гимранова О.М., Тюрин Ю.И. Роль водорода в процессах поглощения энергии ионизирующего излучения системой металл-водород // Поверхность. 2007. № 4. С. 16.
4. Емельянов В.И., Коротеев Н.И. Эффект гигантского комбинационного рассеяния света молекулами, адсорбированными на поверхности металла // УФН. 1981. Т. 135. Вып. 2. С. 345.
5. Никитенков Н.Н., Тюрин Ю.И., Колоколов Д.Ю., Шигалугов С.Х. Модель возбуждения вторичных атомов поверхностными плазмонами // Изв. Томского политехн. ун-та. 2005. Т. 308. № 6. С. 18.
6. Жиялков Л.А., Костановский А.В., Похил Г.П. Условия формирования 2D кулоновского потенциала на поверхности диэлектрика // ТВТ. 2008. Т. 46. № 5. С. 786.

но-теоретические и экспериментальные исследования теплофизических свойств ТЖМТ в конденсированном состоянии в широком температурном диапазоне, а также их коррозионной активности по отношению к реакторным конструкционным материалам, в первую очередь для элементов ТВЭЛов, играют важную практическую роль.

Кроме того, из-за возросших в последние годы требований к безопасности эксплуатации ядерных реакторов их создатели вынуждены были учитывать другие, ранее не принимаемые во внимание физические эффекты и процессы, протекающие в первом контуре, в частности, растворимость инертных газов в жидкометаллических теплоносителях [1]. Поэтому в настоящей работе были оценены величины растворимости газообразных гелия, неона, аргона, криптона и ксенона в расплавленных олове, свинце, висмуте и их эвтектических сплавах в интервале от температуры плавления до 1500 К. Также была установлена ли-

**Таблица 1.** Ядерно-физические характеристики компонентов исследованной системы инертный газ—тяжелый металл

Вещество	Атомный вес, а. е. м.	Диаметр атома, $10^{-10}$ м	Эффективный заряд	Поляризуемость, $10^{-30}$ м <sup>3</sup>
Гелий	4.0026022	2.70	1.7	0.204
Неон	20.17976	3.20	1.5	0.398
Аргон	39.9481	3.42	12.65	1.64
Криптон	83.801	3.66	20.1	2.48
Ксенон	131.292	4.06	24.3	4.01
Олово	118.7107	2.80	4.0	7.7
Свинец	207.21	3.48	4.0	7.3
Висмут	208.980373	3.64	5.0	8.2

**Таблица 2.** Коэффициенты аппроксимирующего уравнения (1)

Параметр	Инертный газ				
	Гелий	Неон	Аргон	Криптон	Ксенон
	Олово				
<i>A</i>	-12.21665	-13.53084	-14.12369	-15.07155	17.52278
<i>B</i>	0.87488	0.72460	3.37804	4.68939	6.40888
<i>C</i>	7.71664	9.83207	10.80855	12.34031	15.66600
<i>D</i>	-2.40663	-3.09566	-3.45834	-4.00921	-5.21818
	Свинец				
<i>A</i>	-13.16463	-15.02472	-16.02745	-17.41852	20.77263
<i>B</i>	0.11965	-0.60404	1.29320	2.17779	3.54320
<i>C</i>	6.71731	7.57785	8.06997	9.06075	11.70382
<i>D</i>	-1.29942	-0.94865	-0.83096	-0.81210	-1.06850
	Висмут				
<i>A</i>	-12.27376	-13.88221	-14.80550	-16.01437	-18.92793
<i>B</i>	0.09165	-0.20809	0.28738	0.56893	1.03191
<i>C</i>	6.55578	8.12235	9.01259	10.21644	12.72880
<i>D</i>	-1.14859	-1.19177	-1.25656	-1.37379	-1.65648

нейная зависимость этой растворимости от равновесного давления инертного газа в системе инертный газ—тяжелый металл.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Ранее авторами настоящей работы была разработана усовершенствованная “дырочная” модель растворимости инертных газов в жидких щелочных металлах в широких диапазонах параметров состояния [2]. В соответствии с этой теорией процесс растворения газа в металлическом расплаве последовательно разбивался на несколько этапов (стадий), для каждого из которых аккуратно запи-

сывался энергетический баланс в системе инертный газ—щелочной металл. Таким образом было получено аналитическое соотношение для расчета растворимости инертных газов в расплавленных щелочных металлах. По нему были рассчитаны таблицы растворимости газообразных гелия, неона, аргона, криптона и ксенона в жидких литии, натрии, калии, рубидии и цезии в интервалах температур 600–1500 К и давлений 0.1–10 МПа [3]. Впоследствии эти таблицы были аттестованы Агентством по техническому регулированию и метрологии РФ (Госстандарт России) в качестве стандартных справочных данных [4].

Таблица 3. Растворимость инертных газов в тяжелых жидкометаллических теплоносителях при давлении 0.1 МПа, моль инертного газа/моль тяжелого металла

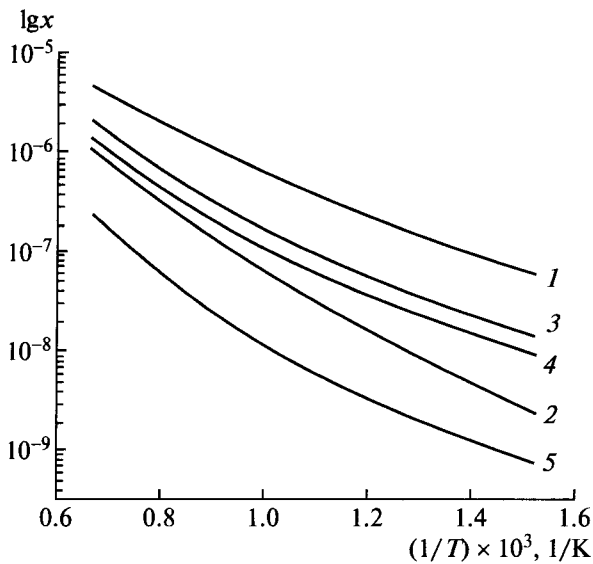
T, К	Инертный газ				
	Гелий	Неон	Аргон	Криптон	Ксенон
Олово					
505.08*	$4.26 \times 10^{-8}$	$1.42 \times 10^{-9}$	$6.40 \times 10^{-8}$	$8.84 \times 10^{-8}$	$1.28 \times 10^{-8}$
600	$9.74 \times 10^{-8}$	$4.57 \times 10^{-9}$	$1.03 \times 10^{-7}$	$1.17 \times 10^{-7}$	$1.56 \times 10^{-8}$
700	$2.04 \times 10^{-7}$	$1.29 \times 10^{-8}$	$1.72 \times 10^{-7}$	$1.71 \times 10^{-7}$	$2.25 \times 10^{-8}$
800	$3.85 \times 10^{-7}$	$3.08 \times 10^{-8}$	$2.82 \times 10^{-7}$	$2.58 \times 10^{-7}$	$3.45 \times 10^{-8}$
900	$6.65 \times 10^{-7}$	$6.51 \times 10^{-8}$	$4.47 \times 10^{-7}$	$3.85 \times 10^{-7}$	$5.32 \times 10^{-8}$
1000	$1.07 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-7}$	$6.78 \times 10^{-7}$	$5.62 \times 10^{-7}$	$8.07 \times 10^{-8}$
1100	$1.62 \times 10^{-6}$	$2.18 \times 10^{-7}$	$9.89 \times 10^{-7}$	$7.97 \times 10^{-7}$	$1.19 \times 10^{-7}$
1200	$2.33 \times 10^{-6}$	$3.56 \times 10^{-7}$	$1.39 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-6}$	$1.70 \times 10^{-7}$
1300	$3.21 \times 10^{-6}$	$5.47 \times 10^{-7}$	$1.88 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-6}$	$2.34 \times 10^{-7}$
1400	$4.27 \times 10^{-6}$	$8.00 \times 10^{-7}$	$2.46 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-6}$	$3.12 \times 10^{-7}$
1500	$5.48 \times 10^{-6}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$3.12 \times 10^{-6}$	$2.36 \times 10^{-6}$	$4.03 \times 10^{-7}$
Висмут					
544.55**	$5.50 \times 10^{-8}$	$2.39 \times 10^{-9}$	$1.33 \times 10^{-9}$	$3.00 \times 10^{-10}$	$7.10 \times 10^{-12}$
600	$9.60 \times 10^{-8}$	$5.10 \times 10^{-9}$	$2.83 \times 10^{-9}$	$6.80 \times 10^{-10}$	$1.87 \times 10^{-11}$
700	$2.30 \times 10^{-7}$	$1.67 \times 10^{-8}$	$9.34 \times 10^{-9}$	$2.50 \times 10^{-10}$	$8.80 \times 10^{-11}$
800	$4.84 \times 10^{-7}$	$4.54 \times 10^{-8}$	$2.61 \times 10^{-8}$	$7.70 \times 10^{-9}$	$3.39 \times 10^{-10}$
900	$9.22 \times 10^{-7}$	$1.08 \times 10^{-7}$	$6.39 \times 10^{-8}$	$2.07 \times 10^{-8}$	$1.12 \times 10^{-9}$
1000	$1.62 \times 10^{-6}$	$2.31 \times 10^{-7}$	$1.41 \times 10^{-7}$	$4.96 \times 10^{-8}$	$3.22 \times 10^{-9}$
1100	$2.68 \times 10^{-6}$	$4.53 \times 10^{-7}$	$2.86 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$8.37 \times 10^{-9}$
1200	$4.20 \times 10^{-6}$	$8.27 \times 10^{-7}$	$5.41 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-7}$	$1.99 \times 10^{-8}$
1300	$6.29 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-6}$	$9.63 \times 10^{-7}$	$4.20 \times 10^{-7}$	$4.36 \times 10^{-8}$
1400	$9.07 \times 10^{-6}$	$2.34 \times 10^{-6}$	$1.63 \times 10^{-6}$	$7.57 \times 10^{-7}$	$8.97 \times 10^{-8}$
1500	$1.27 \times 10^{-5}$	$3.67 \times 10^{-6}$	$2.64 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-6}$	$1.74 \times 10^{-7}$
Свинец					
600.61***	$3.49 \times 10^{-8}$	$1.30 \times 10^{-9}$	$9.35 \times 10^{-9}$	$6.19 \times 10^{-9}$	$4.68 \times 10^{-10}$
700	$8.34 \times 10^{-8}$	$4.34 \times 10^{-9}$	$2.18 \times 10^{-8}$	$1.37 \times 10^{-8}$	$1.09 \times 10^{-9}$
800	$1.76 \times 10^{-7}$	$1.21 \times 10^{-8}$	$4.68 \times 10^{-8}$	$2.87 \times 10^{-8}$	$2.49 \times 10^{-9}$
900	$3.35 \times 10^{-7}$	$2.92 \times 10^{-8}$	$9.32 \times 10^{-8}$	$5.68 \times 10^{-8}$	$5.43 \times 10^{-9}$
1000	$5.89 \times 10^{-7}$	$6.32 \times 10^{-8}$	$1.74 \times 10^{-7}$	$1.07 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-8}$
1100	$9.71 \times 10^{-7}$	$1.25 \times 10^{-7}$	$3.07 \times 10^{-7}$	$1.91 \times 10^{-7}$	$2.25 \times 10^{-8}$
1200	$1.52 \times 10^{-6}$	$2.30 \times 10^{-7}$	$5.17 \times 10^{-7}$	$3.29 \times 10^{-7}$	$4.27 \times 10^{-8}$
1300	$2.26 \times 10^{-6}$	$3.99 \times 10^{-7}$	$8.35 \times 10^{-7}$	$5.45 \times 10^{-7}$	$7.81 \times 10^{-8}$
1400	$3.25 \times 10^{-6}$	$6.58 \times 10^{-7}$	$1.30 \times 10^{-6}$	$8.73 \times 10^{-7}$	$1.37 \times 10^{-7}$
1500	$4.50 \times 10^{-6}$	$1.04 \times 10^{-6}$	$1.97 \times 10^{-6}$	$1.36 \times 10^{-6}$	$2.34 \times 10^{-7}$

\*, \*\*, \*\*\* — температуры плавления олова, висмута и свинца по МТШ-90 соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ АНАЛИЗ

Разработанная в [2] теория растворимости была использована для расчета растворимости инертных газов в расплавленных тяжелых металлах, таких, как олово, свинец и висмут при температурах

600–1500 К и давлении 0.1 МПа. Необходимые для этого ядерно-физические свойства компонентов системы инертный газ–тяжелый металл принимались по литературным данным и приведены в табл. 1. Полученные расчетные значения



Температурная зависимость растворимости инертных газов в расплавленном свинце: 1 – гелий; 2 – неон; 3 – аргон; 4 – криптон; 5 – ксенон.

растворимости инертных газов в жидком олове, свинце и висмуте в исследованном диапазоне температур с шагом 10 К обрабатывались методом наименьших квадратов в интерпретации [5]. В качестве аппроксимирующего уравнения использовалось рекомендуемое в [6] уравнение вида

$$x = A + B/\tau + C \ln \tau + D\tau, \quad (1)$$

где  $x$  – растворимость инертного газа в жидком металле в молях инертного газа на моль тяжелого металла;  $\tau = T/1000$  и  $T$  в К по Международной температурной шкале 1990 г. (МТШ-90).

Регрессионно-статистический анализ результатов этой обработки показал, что для каждой из исследованных систем инертный газ–тяжелый металл оптимальным является четырехчленное уравнение (1). Его коэффициенты представлены в табл. 2. Среднее квадратическое отклонение данных от результатов расчета по аппроксимирующему уравнению (1) для всех исследованных систем инертный газ–тяжелый металл не превышало 0.1%.

Рассчитанные по (1) величины растворимости газообразных гелия, неона, аргона, криптона и ксенона в расплавленных олове, свинце и висмуте в температурном интервале 600–1500 К и при давлении 0.1 МПа приведены в табл. 3. В качестве примера на рисунке в полулогарифмическом масштабе представлена зависимость растворимости инертных газов в жидком свинце от температуры. Согласно “дырочной” модели растворимость инертных газов в жидких металлах линейно зависит от давления в исследованной системе инертный газ–металли-

ческий раствор. Тогда для нашего случая можно записать

$$x_p = (p/p_0)x_{10} = qx_{10}, \quad (2)$$

где  $x_{10}$ ,  $x_p$  – растворимость инертных газов в ТЖМТ при расчетном давлении  $p_0 = 0.1$  МПа и равновесном давлении в системе  $p$  в МПа соответственно;  $q = p/p_0$ .

Погрешность расчетных значений растворимости инертных газов в ТЖМТ оценивалась ранее в предварительном сообщении [7] и составляла величину одного порядка. Об этом же свидетельствует и сравнение расчетных данных настоящей работы с результатами относительно старого и не очень надежного измерения растворимости криптона в жидких олове и свинце в температурном диапазоне 1100–1600 К и при давлении 1 атм [8].

Кроме чистых тяжелых металлов, речь о которых шла выше, в качестве перспективных ТЖМТ рассматриваются также эвтектические сплавы их взаимных двойных систем Sn–Pb, Sn–Bi и Pb–Bi. Растворимость инертных газов в этих сплавах в жидком состоянии может быть рассчитана примерно с той же погрешностью по закону аддитивности, который для случая свинец–висмутовой эвтектики приведен в [7].

Из табл. 3 видна следующая закономерность: растворимость инертных газов в ТЖМТ увеличивается с ростом температуры, а также с уменьшением атомного веса инертного газа и увеличением атомного веса тяжелого металла. Однако в отдельных случаях (см., например, системы неон–олово и криптон–олово) эта закономерность нарушается, что объясняется, по-видимому, недостаточной надежностью и точностью литературных данных, принимаемых при расчете растворимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определена растворимость газообразных гелия, неона, аргона, криптона и ксенона в жидких олове, свинце, висмуте и их взаимных эвтектических сплавах в широких интервалах температур и давлений и оценена ее погрешность. Полученные расчетные данные могут использоваться, в частности, при анализе влияния растворенных инертных газов на структуру и гидродинамику потока ТЖМТ в первом контуре ядерных реакторов на быстрых нейтронах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончар Н.И., Панкратов Д.В. Модель переноса газообразной активности по первому контуру моноблочной РУ с СВТ. В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ–2008) // Тезисы докладов 3-ей Межотрас-