

## Глава 4. Щелочные металлы

### 4.1. Имеющийся справочный материал

Интенсивные экспериментальные и расчётно–теоретические исследования теплофизических свойств жидких щелочных металлов и их паров осуществляются в России и за рубежом с начала 60–х годов. В настоящее время в этой области накоплен обширный материал, который неоднократно подвергался систематизации. Первые результаты этой деятельности представлены в справочнике [4.1], подготовленном коллективом авторов из МЭИ и ИВТАН, а также в монографии сотрудников ФЭИ [4.2]. Из последующих изданий подобного рода следует упомянуть фундаментальный справочник ИВТ РАН [4.3], который содержит тщательно отобранные данные о термодинамических свойствах щелочных металлов в конденсированном (твёрдом и жидком) состоянии, в состоянии разреженного газа, а также на линии насыщения, монографию [4.4], написанную коллективом отечественных (ИВТ РАН, МАИ) и зарубежных авторов и охватывающую практически весь материал о свойствах щелочных металлов, накопленный к моменту её издания (к сожалению, однако, не согласованный), а также книгу авторов из ФЭИ [4.5]. Наиболее систематизированные и внутренне согласованные справочные данные о свойствах твёрдых и жидких щелочных металлов, их бинарных и тройных растворов и паров рассматриваемых систем в диапазоне температур от 200 до 2500 К и давлений до десятков МПа содержатся в монографии [4.6], написанной коллективом авторов из ИВТ РАН.

Вместе с тем вплоть до настоящего времени продолжается работа по уточнению справочных данных о теплофизических свойствах паров щелочных металлов с использованием как результатов экспериментов, так и теоретических расчётов на основе современных молекулярных данных.

Справочные данные, представленные в настоящей главе, почерпнуты из процитированных выше источников, других опубликованных в научной литературе материалов обзорного и справочного характера, а также из обобщений, которые были выполнены в последние годы авторами предлагаемого справочника.

### 4.2. Пары щелочных металлов (Li, Na, K)

#### 4.2.1. Литий [go to MCS](#)

Термодинамические свойства пара лития с учётом его неидеальности впервые были представлены в справочнике [4.1] как результат теоретического расчёта. С этой целью было использовано весьма приближённое уравнение состояния паров щелочных металлов. Имевшиеся в то время спектроскопические исходные данные, на которых основывался расчёт, обладали низкой точностью. В ряде последующих справочных изданий пар натрия рассматривался как идеальный химически реагирующий газ, в котором из атомов образуются димеры.

В справочнике [4.4] были репродуцированы таблицы, рассчитанные теоретическим путём П.М.Кессельманом и С.Ф.Горыкиным [4.7]. В рамках этого расчёта пар лития рассматривался как неидеальный химически реагирующий газ, состоящий из мономеров Li и димеров Li<sub>2</sub>. Расчёт выполнен на достаточно высоком методическом уровне, но качество исходных данных, использованных для вычисления термодинамической константы равновесия реакции  $2\text{Li} \rightarrow \text{Li}_2$ , а также “поправок” на взаимодействие указанных молекул, было по–прежнему низким. К тому же этой работе свойственны обычные трудности “метода смеси”, когда для оценки вкладов от взаимодействий частиц, содержащих в сумме более двух ис-

ходных атомов, приходится использовать модели, не вытекающие из строгой теории.

Методически более последовательной является работа [4.8], в которой расчёт термодинамических свойств пара лития выполнен методом “исходных атомов” с учётом взаимодействий двух, трёх и четырёх атомов. Исходными данными для вычисления соответственно второго, третьего и четвёртого групповых интегралов служили результаты квантовомеханических расчётов синглетного и триплетного потенциалов взаимодействия двух атомов лития [4.9,4.10], на базе которых с использованием довольно грубой модели были построены потенциалы взаимодействия трёх и четырёх атомов.

В отличие от паров других щелочных металлов, экспериментальные данные о термодинамических свойствах пара лития полностью отсутствуют. Поэтому, как и ранее, в настоящее время единственной основой для создания справочных данных о рассматриваемых свойствах этого вещества остаётся теоретический расчёт, выполняемый на основе имеющихся молекулярных данных. Однако в последние годы существенно уточнены спектроскопические данные, необходимые для построения синглетного потенциала взаимодействия двух атомов, и впервые выполнены измерения колебательно-вращательного спектра димера в триплетном состоянии [4.11,4.12]. В сочетании с упомянутыми выше результатами квантовомеханических расчётов это позволяет на два-три порядка более точно рассчитать второй групповой интеграл. К сожалению, точность теоретического расчёта старших групповых интегралов [4.8] улучшить пока не удаётся. Результаты аналогичных расчётов, выполненных для пара натрия, показывают, что расхождения с экспериментом составляют порядок величины, а для третьего группового интеграла теория предсказывает даже неверный знак.

В настоящем справочнике расчёт термодинамических свойств пара лития выполнен с учётом только второго группового интеграла, вычисленного теоретически на основе данных [4.9–4.12] с погрешностью, не превышающей 0.1%. Одновременно тот же расчёт был выполнен с учётом как второго, так третьего и четвёртого групповых интегралов, принятых по [4.8]. Разницу между результатами обоих расчётов предлагается рассматривать как погрешность предлагаемых справочных данных. Эта разница, разумеется, намного превышает погрешность, вызванную указанной выше неопределённостью второго группового интеграла. Стандартные термодинамические функции атомарного лития приняты по справочнику [4.3]. Следует отметить, что принятое в [4.3] значение энергии диссоциации молекулы  $\text{Li}_2$  с учётом новых спектроскопических данных должно быть подвергнуто заметному уточнению.

Предлагаемые справочные данные распространяются до температуры 3000 К и давлений от насыщения до 10 МПа. Их погрешность, оцениваемая по предлагаемой методике, максимальна на линии насыщения и увеличивается с ростом температуры (давления). При температурах 1500, 2000 и 2500 К (давления насыщения 0.043, 0.88 и 5.64 МПа) она составляет для плотности и изобарной теплоёмкости соответственно: 0.4 и 4.5%, 5 и 28%, 19 и 35%.

Имеются стандартные справочные данные [4.2.13] о свойствах переноса (коэффициентах вязкости, теплопроводности и числе Прандтля) пара лития при температурах до 2500 К и давлениях от соответствующих одноатомному разреженному газу до насыщения. Они базируются на результатах теоретического расчёта [4.2.14] и обработки на основе теоретической модели экспериментальных данных о коэффициентах вязкости и теплопроводности пара лития [4.2.15].

Однако использованные в [4.2.13, 4.2.14] для расчёта сечений столкновений атомов спектроскопические данные в настоящее время устарели, и при подготов-

ке настоящего справочника этот расчёт был вновь проделан с использованием новых данных [4.2.11, 4.2.12]. Результаты этих расчётов оказались на 3 – 5% выше, чем [4.2.14], причём расхождения полностью объясняются различием потенциалов межатомного взаимодействия.

В основу предлагаемых таблиц положен теоретический расчёт коэффициентов переноса пара лития, в котором использованы новые данные о сечениях столкновений атомов лития и данные из [4.2.14] о сечениях столкновений атомов и молекул (димеров) лития. Вследствие довольно существенного увеличения сечений столкновений атомов отпала необходимость в значительной (в полтора раза) корректировке сечений столкновений атомов с молекулами, потребовавшаяся в [4.2.13, 4.2.15] для согласования результатов расчёта коэффициентов переноса с экспериментальными данными. При низких давлениях данные предлагаемых таблиц на 4 – 5% ниже, чем справочные данные [4.2.13] и эксперимент. Эти расхождения меньше суммарной погрешности расчёта и эксперимента. При средних и повышенных давлениях предлагаемые таблицы согласуются со стандартом [4.2.13] и экспериментом в пределах до 3 – 5%, что также не превосходит суммарную погрешность расчёта и эксперимента. Таким образом, нет никакой необходимости в дополнительной “подгонке” результатов теоретического расчёта к экспериментальным данным.

Таблица 4.2.1. Термодинамические свойства пара лития на линии насыщения.

[online-calculation](#)

Таблица 4.2.2. Термодинамические свойства пара лития в однофазной области

[go to MCS](#)

Таблица 4.2.3. Переносные свойства пара лития на линии насыщения

[online-calculation](#)

Таблица 4.2.4. Переносные свойства пара лития в однофазной области

[go to MCS](#)

4.2.2. Натрий [go to MCS](#)

Термодинамические свойства пара натрия с учётом его неидеальности впервые были представлены в справочнике [4.1] как результат теоретического расчёта. С этой целью было использовано весьма приближённое уравнение состояния паров щелочных металлов. Имевшиеся в то время спектроскопические исходные данные, на которых основывался расчёт, обладали низкой точностью. Экспериментальные данные о плотности пара натрия [4.16] процитированы в [4.1], но при подготовке справочных данных не использовались. В ряде последующих справочных изданий пар натрия рассматривался как идеальный химически реагирующий газ, в котором из атомов образуются димеры. В справочнике [4.6] были репродуцированы таблицы термодинамических свойств пара натрия [4.17], рассчитанные на основе полуэмпирического уравнения состояния, параметры которого получены путём обработки эксперимента о плотности [4.16] и спектроскопической информации о потенциалах взаимодействия атомов.

В предлагаемый справочник частично помещены таблицы из работы авторов [4.18, 4.19], уточняющие данные [4.17] за счёт использования новейшей спектроскопической информации о димерах натрия и более тщательной обработки результатов измерений [4.16]. Начало отсчета энтальпии принято равным тепловому эффекту реакции образования газообразного натрия [4.3]. Указанные таблицы рассчитаны в диапазоне температур 700 – 2500 К и давлений от насыщенного пара до 3 МПа. Там же приведены таблицы среднеквадратичных отклонений рассчитанных термодинамических функций. Они составляют на линии насыще-

ния в зависимости от давления 0.2 – 1% по плотности, 0.1 – 0.5% по энтальпии, 0.1 – 0.2% по энтропии и 6 – 10% по изобарной теплоёмкости и быстро уменьшаются при удалении в область перегретого пара.

Расхождения таблиц [4.19] с уточняемыми данными [4.17] в среднем не выходят за пределы указанных погрешностей. В [4.18] показано также, что предлагаемые таблицы находятся в разумном согласии с предшествующими обобщениями [4.20] и [4.21], но обладают большей точностью и надёжностью.

Данные о коэффициентах вязкости и теплопроводности пара натрия, содержащиеся в справочнике [4.4], который считается одним из наиболее авторитетных изданий, получены путём обработки результатов измерений указанных коэффициентов переноса [4.22 – 31]. Однако в [4.32] продемонстрировано, что указанные эксперименты недостаточно хорошо согласуются между собой, а кроме того, большинство из них систематически (в сторону завышения) отклоняется от результатов выполненного в этой работе теоретического расчёта, основанного на прецизионных спектроскопических данных о взаимодействии атомов натрия. Поскольку, как показано в [4.32], точность теоретического расчёта выше, чем теплофизических измерений, было сочтено целесообразным основывать справочные данные на результатах упомянутого теоретического расчёта.

В [4.32] приведены таблицы коэффициентов вязкости и теплопроводности пара натрия в диапазоне температур от 600 до 2500 К и давлений от насыщения до 1 МПа. Эти таблицы частично воспроизведены в настоящем справочнике. Кроме того, в [4.32] рассчитаны таблицы среднеквадратичных отклонений указанных справочных данных. При низких давлениях, когда доля двухатомных молекул в паре натрия менее 1%, погрешность представленных справочных данных по обоим коэффициентам переноса составляет 2–3%. При повышенных давлениях погрешности данных о коэффициентах вязкости и теплопроводности не превышают соответственно 5–6% и 8–10%.

При низких давлениях данные справочника [4.4] завышены по сравнению с помещёнными здесь таблицами на 12–15%; расхождения при повышенных давлениях не выходят за пределы суммарной погрешности таблиц. Предлагаемые справочные данные являются, по мнению авторов настоящего издания, более надёжными.

Таблица 4.2.5. Термодинамические свойства пара натрия на линии насыщения

[online-calculation](#)

Таблица 4.2.6. Термодинамические свойства пара натрия в однофазной области

[go to MCS](#)

Таблица 4.2.7. Переносные свойства пара натрия на линии насыщения

[online-calculation](#)

Таблица 4.2.8. Переносные свойства пара натрия в однофазной области

[go to MCS](#)

4.2.4. Калий [go to MCS](#)

Термодинамические свойства пара калия с учётом его неидеальности впервые были представлены в справочнике [4.1] как результат теоретического расчёта. С этой целью было использовано весьма приближённое уравнение состояния паров щелочных металлов. Имевшиеся в то время спектроскопические исходные данные, на которых основывался расчёт, обладали низкой точностью. Экспериментальные данные о плотности пара калия [4.16] процитированы в [4.1], но при подготовке справочных данных не использовались. В ряде последующих справочных изданий пар калия рассматривался как идеальный химически реагирую-

щий газ, в котором из атомов образуются димеры. В справочнике [4.6] были репродуцированы таблицы термодинамических свойств пара калия [4.17], рассчитанные на основе полуэмпирического уравнения состояния, параметры которого получены путём обработки эксперимента о плотности [4.16] и спектроскопической информации о потенциалах взаимодействия атомов. В [4.17] результаты расчётов на основе указанного уравнения состояния были сопоставлены с экспериментальными данными об изобарной теплоёмкости и скорости звука в паре калия [4.33, 4.34] при давлении, близком к атмосферному, и в сравнительно узком интервале температур вблизи температуры насыщения, а также о плотности в небольшом диапазоне высоких температур и давлений [4.35]. Данные [4.16] были также положены в основу таблиц термодинамических свойств пара калия [4.17]. В дальнейшем были выполнены более полные измерения плотности пара калия [4.36] в интервале температур и давлений, существенно расширенном по сравнению с [4.16] и перекрывающем данные [4.35]. В результате совместной обработки экспериментов [4.7] и [4.30] были построены таблицы термодинамических свойств пара калия [4.37], охватывающие весь исследованный диапазон температур и давлений.

В предлагаемый справочник частично помещены таблицы из работы авторов [4.35], уточняющие уравнение состояния [4.17] за счёт использования новейшей спектроскопической информации о димерах калия как в основном, так и в возбуждённых электронных состояниях [4.39, 4.40] и обработки результатов измерений плотности пара калия [4.36] совместно с [4.16]. Начало отсчета энтальпии принято равным тепловому эффекту реакции образования газообразного калия [4.3]. Указанные таблицы рассчитаны в диапазоне температур 700 – 2500 К и давлений от насыщенного пара до 10 МПа. Там же приведены таблицы среднеквадратичных отклонений рассчитанных термодинамических функций. Они составляют на линии насыщения в зависимости от давления 0.2 – 2% по плотности, 0.1 – 0.7% по энтальпии, 0.1 – 0.2% по энтропии и 3 – 10% по изобарной теплоёмкости и быстро уменьшаются при удалении в область перегретого пара.

Расхождения таблиц [4.38] с уточняемыми данными [4.17] в среднем не выходят за пределы указанных погрешностей. В [4.38] показано также, что предлагаемые таблицы находятся в разумном согласии с предшествующими обобщениями [4.20] и [4.37], но обладают большей точностью и надёжностью.

Данные о коэффициентах вязкости и теплопроводности пара калия, содержащиеся в справочнике [4.4], который считается одним из наиболее авторитетных изданий, получены путём обработки результатов измерений указанных коэффициентов переноса [4.22, 4.23, 4.27, 4.28, 4.41 – 4.44]. Однако в [4.45] продемонстрировано, что указанные эксперименты недостаточно хорошо согласуются между собой, а кроме того, большинство из них систематически (в сторону завышения) отклоняется от результатов выполненного в этой работе теоретического расчёта, основанного на прецизионных спектроскопических данных о взаимодействии атомов калия. Поскольку, как показано в [4.45], точность теоретического расчёта выше, чем теплофизических измерений, было сочтено целесообразным основывать справочные данные на результатах упомянутого теоретического расчёта.

В [4.45] приведены таблицы коэффициентов вязкости и теплопроводности пара калия в диапазоне температур от 600 до 2000 К и давлений от насыщения до 1 МПа. Эти таблицы частично воспроизведены в настоящем справочнике. Кроме того, в [4.45] рассчитаны таблицы среднеквадратичных отклонений указанных справочных данных. При низких давлениях, когда доля двухатомных молекул в паре натрия менее 1%, погрешность представленных справочных данных по обоим коэффициентам переноса составляет 2–3%. При повышенных давлениях по-

грешности данных о коэффициентах вязкости и теплопроводности не превышают соответственно 5–6% и 8–10%.

Данные справочника [4.4] при всех давлениях завышены по сравнению с помещёнными здесь таблицами на 6–8%; при низких давлениях эти расхождения выходят за пределы суммарной погрешности таблиц. Предлагаемые справочные данные являются, по мнению авторов настоящего издания, более надёжными.

Таблица 4.2.9. Термодинамические свойства пара калия на линии насыщения

[online-calculation](#)

Таблица 4.2.10. Термодинамические свойства пара калия в однофазной области

[go to MCS](#)

Таблица 4.2.11. Переносные свойства пара калия на линии насыщения.

[online-calculation](#)

Таблица 4.2.12. Переносные свойства пара калия в однофазной области

[go to MCS](#)

Рассчитать таблицы термодинамических свойств паров щелочных металлов можно с помощью программы ALKVAPOR, а транспортных - программы TRPRALM.

### 4.3. Жидкие щелочные металлы (Li, Na, K).

#### 4.3.1. Источники информации

Свойства жидких щелочных металлов рассмотрены во многих справочниках и руководствах [4.1] – [4.6]. Детальные критические обзоры отдельных свойств можно найти в изданиях Теплофизического Центра ИВТ РАН [4.45] – [4.52]. В данной сводке приведен ограниченный объем данных из справочной литературы. Плотность жидкой фазы на линии насыщения принята по данным обзора [4.48], давление насыщения по таблицам ГСССД [4.53]. Термодинамические свойства (энтальпия, энтропия и теплоемкость) приняты по таблицам из фундаментального справочного издания [4.3]. При этом калорические величины пересчитаны на килограмм массы, что соответствует потребностям теплотехнического расчета. В качестве начала отсчета принята температура  $T=0$  К, так что в качестве энтальпии здесь фигурирует величина  $H^0(T) - H^0(0)$  из справочника [4.3], что обеспечивает термодинамическую согласованность с данными по газовой фазе из предыдущей главы. Критические постоянные приняты по рекомендациям авторов [4.49], температуры плавления и кипения — по данным справочника “Термические константы веществ” [4.54]. Данные по переносным свойствам приняты: для вязкости — из критического обзора Шпильрайна Э.Э. и соавт. [4.47], для теплопроводности — из справочника Варгафтика Н.Б. и др. [4.55]. Необходимо отметить, что в обоих последних источниках [4.47], [4.55] порядки указанных величин приведены с опечатками.



### 4.3.2. Литий

Атомная масса 6.941. Критическая температура  $3680 \pm 300$  К; критическое давление  $60 \pm 15$  МПа; критическая плотность  $126 \pm 46$  кг/м<sup>3</sup>; температура плавления 453.69 К.

Таблица 4.3.1. Термодинамические свойства жидкого лития на линии насыщения

[online-calculation](#)

Таблица 4.3.2. Переносные свойства жидкого лития на линии насыщения

[online-calculation](#)

### 4.3.3. Натрий

Атомная масса 22.98977. Критическая температура  $2503 \pm 50$  К; критическое давление  $25.64 \pm 1.5$  МПа; критическая плотность  $207 \pm 30$  кг/м<sup>3</sup>; температура плавления 371.01 К; нормальная температура кипения 1159 К; теплота испарения в точке кипения .21.53 ккал/моль.

Таблица 4.3.3. Термодинамические свойства жидкого натрия на линии насыщения

[online-calculation](#)

Таблица 4.3.4. Переносные свойства жидкого натрия на линии насыщения.

[online-calculation](#)

### 4.3.4. Калий

Атомная масса 39.0983. Критическая температура 2281 (+20, -50) К; критическое давление  $16.40 \pm 1$  МПа; критическая плотность  $194 \pm 25$  кг/м<sup>3</sup>; температура плавления 336.66 К; нормальная температура кипения 1034 К; теплота испарения в точке кипения .18.3 ккал/моль.

Таблица 4.3.5. Термодинамические свойства жидкого калия на линии насыщения

[online-calculation](#)

Таблица 4.3.6. Переносные свойства жидкого калия на линии насыщения.

[online-calculation](#)

Рассчитать таблицы теплофизических свойств жидких щелочных металлов можно с помощью программы FORMCALC.

## 4.4. Термодинамические свойства цезия и рубидия

### 4.4.1. Методика расчета

В данном разделе представлены справочные данные, основанные на разработанных в ИВТ РАН (Фокин Л.Р., Попов В.Н., Мозговой А.Г.) новых уравнениях состояния цезия и рубидия. Уравнения состояния для паровой фазы построены в виде групповых разложений [4.55, 4.56] по степеням активности  $\xi$

$$\frac{P}{RT} = \sum_j b_j(T) \xi_j$$
$$\rho = \sum_j j b_j(T) \xi_j$$

$b_j(T)$  - групповые интегралы, из которых  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -B$ , где  $B$  - второй вириальный коэффициент, определяемый в основном синглетной потенциальной кривой. Наличие новых прецизионных данных по колебательно-вращательным спектрам димерных молекул  $Cs_2$  и  $Rb_2$  позволили существенно уточнить значения энергии диссоциации и второго вириального коэффициента, что в целом отразилось на точности и достоверности всего группового разложения для обоих веществ. Повышенная точность уравнения состояния и рассчитанных на его основе термодинамических таблиц обеспечена также процедурой согласования данных для паровой и жидкой фаз. При построении уравнений состояния использовался метод совместной обработки *PVT*-данных и данных по скорости звука паровой фазы с данными по энтальпии и теплоемкости жидкой фазы. В результате обработки можно рассчитать таблицы свойств пара (в однофазной области и на линии насыщения) и жидкости (на линии насыщения), причем на границе двух фаз автоматически обеспечено термодинамическое согласование данных в виде равенства химических потенциалов. Данные для *Cs* охватывают диапазон температур до 1700 К, для *Rb* до 1600 К, при давлении до 5 МПа для обоих веществ. Рассчитать таблицы для обоих веществ при произвольных значениях параметров пользователь может с помощью программы *PROPERTY*. Программа имеет несколько больше возможностей, чем другие, использованные в справочнике, в частности, она позволяет считать свойства двухфазной области при произвольном соотношении паровой и жидкой фаз (а не только на пограничных кривых), вычисляет по запросу пользователя матрицу ошибок, позволяет менять режим вывода, размерность физических величин и т. п. Поэтому перед использованием программы следует ознакомиться с ее описанием *PROPERTY\_descr*.

Подробное изложение методики и термодинамические таблицы для цезия можно найти в препринте [4.57], электронная версия которого подключена к справочнику.

### 4.4.2. Основные константы

Цезий

Атомная масса 132.9054

Критические параметры [4.48]: температура 2043 ±15 К; критическое давление 11.75±0.3 МПа; критическая плотность 430±40 кг/м<sup>3</sup>; температура плавления 301.59 К [4.3]; нормальная температура кипения 942.127 К и теплота испарения в точке кипения, 485.2 кДж/кг, рассчитаны для данного справочника.



## Рубидий

Атомная масса 85.4678

Критические параметры [4.48]: температура  $2106 \pm 15$  К; давление  $13.22 \pm 1.5$  МПа; плотность  $347 \pm 35$  кг/м<sup>3</sup>

Температура плавления 312.47 К [4.3]

Нормальная температура кипения, 960.181 К и теплота испарения в точке кипения, 795.7 кДж/кг, рассчитаны для данного справочника.

### Литература к главе 4.

1. Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Тощий Е.Е. и др. Теплофизические свойства щелочных металлов./Ред. Кириллин В.А. М.: Из-во стандартов, 1970. 488 с
2. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат, 1970. 295 с.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник в 4 томах. /Ред. В.П.Глушко. Т.4. М.: Наука, 1982.
4. Handbook of thermodynamic and transport properties of alkali metals. /Ed. Ohse R.W. Oxford: Blackwell Scy. Publ., 1985. 987 p.
5. Бобков В.П., Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С. Теплогидравлические расчёты по свойствам материалов в ядерной технике. М.: Энергоатомиздат, 1992. 311 с.
6. Bystrov P.I., Kagan D.N., Krechetova G.A., Shpilrain E.E. Liquid metal coolens for heat pipes and power plants. N.Y.–Wash.–Phyl.–Lond.: Hemisphere Publ. Corp., 1990. 272 p.
7. Горыкин С.Ф. Термодинамические свойства паров лития и водорода при высоких температурах с учётом неидеальности и химических реакций // Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Одесса: ОТИ, 1968. – 24 с.
8. Кригер В.А., Лунин В.Ю., Семёнов А.М. Расчёт термодинамических свойств пара лития «из первых принципов» // ТВТ. 1086. Т. 24. № 3. С. 474–482.
9. Olson M.L., Konovalov D.D. Accurate Potential Energy Curves for the  $^3\Sigma_u^+$  and  $b^3\Sigma_g^+$  States of  $\text{Li}_2$  // Chem.Phys. 1977. V. 21. № 3. P. 393–399.
10. Konovalov D.D., Olson M.L. The Electronic Structure and Spectra of the  $X^1\Sigma_g^+$  and  $A^1\Sigma_u^+$  States of  $\text{Li}_2$  // J.Chem.Phys. 1979. V. 71. № 1. P. 450–457.
11. Zemke W.T., Stwalley W.C. Analisis of Long-Range Dispersion and Exchange Interactions of Two Lithium Atoms // J.Chem.Phys. 1993. V. 97. № 10. P. 2053–2058.
12. Baracat B., Bacis R., Carrot F., et all. Extensive Analysis of the  $X^1\Sigma_g^+$  Ground State of  $^7\text{Li}_2$  by Laser-Induced Fluorescence Fourier Transform Spectrometry // Chem.Phys. 1986. V. 102. № 1. P. 215–227.
13. Stone J.R., Ewing C.T., Spann J.R. et al. High-Temperature pVT-Properties of Sodium, Potassium, Cesium // J. Chem. Eng. Data. 1966. V. 11. No. 3. P. 309.
14. Рева Т.Д., Семёнов А.М. Расчёт термодинамических свойств паров натрия и калия на основе полуэмпирического уравнения состояния // ТВТ. 1984. Т. 22. № 3. С. 463; № 4. С. 692; № 5. С. 874.
15. Кузнецова О.Д., Семёнов А.М. Уравнение состояния пара натрия // ТВТ. 1999. Т.37. №. С..

16. Кузнецова О.Д., Семёнов А.М. Новые справочные данные о термодинамических свойствах пара натрия // ТВТ. 1999. Т.37. №. С..
17. Фокин Л.Р., Теряев В.В., Трелин Ю.С., Мозговой А.Г. Термодинамические свойства паров натрия и калия. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 4(42). М.: ИВТАН, 1983. С.44.
18. Fink J.K., Leibowitz L. A consistent assessment of the thermophysical properties of sodium // High Temp. Mater. Sci. 1996. V. 35. No. 1. P. 65–103.
19. Стефанов Б.И., Тимрот Д.Л., Тоцкий Е.Е., Чжу Вень-Хао. Экспериментальное исследование вязкости и теплопроводности паров натрия и калия // ТВТ. 1966. Т. 4. № 1. С. 141.
20. Lee D.J., Bonilla C.F. The viscosity of the Alkali Metal Vapours // Nucl. Eng. and Design. 1968. V. 7. N. 5. P. 455.
21. Сидоров Н.И., Тарлаков Ю.В., Яргин В.С. Результаты экспериментального исследования вязкости паров натрия / Изв. вузов: Энергетика, 1976. № 11. С. 93.
22. Тимрот Д.Л., Варава А.Н. Экспериментальное определение вязкости паров Na / ТВТ. 1977. Т. 15. № 15. С. 750.
23. Степаненко И.Ф., Сидоров Н.И., Тарлаков Ю.В., Яргин В.С. Экспериментальное исследование вязкости паров Li и Na при высоких температурах / Деп. В ВИНТИ 26.12.86 № 8931–В86.
24. Тимрот Д.Л., Тоцкий Е.Е. Экспериментальное определение теплопроводности паров натрия и калия в зависимости от температуры и давления // ТВТ. 1967. Т. 5. № 5. С. 793.
25. Варгафтик Н.Б., Воцинин А.А. Экспериментальное исследование теплопроводности паров натрия и калия // ТВТ. 1967. Т. 5. № 5. С. 802.
26. Варгафтик Н.Б., Воцинин А.А., Керженцев В.В., Студников Е.Л. Экспериментальное определение теплопроводности паров Na // ТВТ. 1973. Т. 11. № 2. С. 422.
27. Тимрот Д.Л., Махров В.В., Свириденко В.И. Метод нагретой нити с нулевым участком для агрессивных веществ и определение теплопроводности пара Na // ТВТ. 1976. Т. 14. № 1. С. 67.
28. Махров В.В., Пильненьский Ф.И. Особенности анализа экспериментальных данных по теплопроводности и температурному скачку диссоциирующих газов при малых давлениях. Пары натрия // ТВТ. 1983. Т. 21. № 5. С. 890.
29. Кузнецова О.Д., Семёнов А.М. Новые справочные данные о коэффициентах переноса пара натрия // ТВТ. 1999. Т.37. №. С..
30. Варгафтик Н.Б., Воляк Л.Д., Тарлаков Ю. В. Экспериментальное исследование теплоемкости паров калия // ИФЖ. 1968. Т. 15. № 5. С. 893–898.
31. Фокин Л.Р., Теряев В.В., Трелин Ю.С. Акустические свойства паров щелочных металлов // В сб.: Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 1(27). М.: ИВТАН, 1981. С. 3–57.
32. Варгафтик Н.Б., Воляк Л.Д., Анисимов В.М. и др. Термодинамические свойства цезия и калия при высоких температурах и давлениях // ИФЖ. 1980. Т. 39. № 6. С. 986–992.
33. Варгафтик Н.Б., Никитин А.Н., Степанов В.Г. и др. Термодинамические свойства перегретого пара калия при температурах до 2150 К и давлениях до 10 МПа. 1. Экспериментальное исследование термодинамических свойств // ИФЖ. 1990. Т. 59. № 6. С. 923–928.

34. Варгафтик Н.Б., Никитин А.Н., Степанов В.Г. Термодинамические свойства перегретого пара калия при температурах до 2150 К и давлениях до 10 МПа. 2. Расчет термодинамических свойств // ИФЖ. 1991. Т. 60. № 3. С. 467–473.
35. Кузнецова О.Д., Семёнов А.М. Новые справочные данные о термодинамических свойствах пара калия. // ТВТ. 1997. Т. 35. № 2. С. 234–248; 1999. Т. 37. № 2. С. 347–350.
36. Кузнецова О.Д., Семенов А.М. Потенциалы взаимодействия двух атомов калия // ТВТ. 1997. Т. 35. № 6. С. 987–990.
37. Кузнецова О.Д., Семенов А.М. Усредненные сечения столкновений двух атомов и второй групповой интеграл пара калия // ТВТ. 1998. Т. 36. № 1. С. 55–58; № 3. С. 410.
38. Варгафтик Н.Б., Сидоров Ю.В., Тарлаков Ю.В., Яргин В.С. Экспериментальное исследование вязкости паров калия // ТВТ. 1975. Т. 13. № 5. С. 974–978.
39. Тимрот Д.Л., Реутов Б.Ф., Макаров В.Е. Экспериментальное исследование вязкости паров калия. Деп. рук. в НИИ информэнергомаш № 225ЭМ–Д84 / Библ. ук-ль ВИНТИ № 12(158). С. 214.
40. Тимрот Д.Л., Махров В.В., Реутов Б.Ф. Экспериментальное исследование теплопроводности паров калия // ТВТ. 1978. Т. 16. № 6. С. 1210–1217.
41. Gerasimov N., Stefanov B., Zarkova L. Thermal conductivity of monoatomic potassium vapour in the range 1200–1900 K // J. Phys. D: Appl. Phys. 1980. № 13. P. 1841–1844.
42. Кузнецова О.Д., Семенов А.М. Сравнение результатов теоретического расчёта коэффициентов переноса пара калия с экспериментальными данными // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 1. С. 56–61.
43. Кузнецова О.Д., Семенов А.М. Новые справочные данные о коэффициентах переноса пара калия // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 2. С. 1–10.
44. Шебзухов А.А., Осико Т.А., Кожокова Ф.М., Мозговой А.Г. Поверхностное натяжение жидких щелочных металлов и их сплавов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 5 (31). М.: ИВТАН, 1981.
45. Новиков И.И., Рощупкин В.В., Трелин Ю.С., Цыганова Т.А., Мозговой А.Г. Скорость звука в жидких щелочных металлах. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 5 (31). М.: ИВТАН, 1981.
46. Шпильрайн Э.Э., Фомин В.А., Сквородько С.Н., Шарыкин Ю.И. Вязкость жидких щелочных металлов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 6 (32). М.: ИВТАН, 1981.
47. Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Мозговой А.Г. Плотность и тепловое расширение жидких щелочных металлов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 6 (44). М.: ИВТАН, 1983.
48. Мозговой А.Г., Фокин Л.Р., Чернов А.И. Критические параметры щелочных металлов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 5 (49). М.: ИВТАН, 1984.
49. Мозговой А.Г., Новиков И.И., Покрасин М.А., Рощупкин В.В., Теряев В.В. Давление насыщенных паров щелочных металлов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 1 (51). М.: ИВТАН, 1985.
50. Макаренко И.Н., Стишов С.М., Николаенко А.М. Уравнение состояния и термодинамика плавления щелочных металлов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 5 (61). М.: ИВТАН, 1986.
51. Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение щелочных металлов и сплавов с их участием. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 3 (89), № 4 (90) М.: ИВТАН, 1991.

- 52.ГСССД 112-87. Литий, натрий, калий, рубидий, цезий. Давление насыщенных паров при высоких температурах./ А.Г. Мозговой, В.В.Рощупкин, М.А.Покрасин, Л.Р.Фокин, Н.Э.Хандомирова. М.: Изд-во стандартов, 1988. 38 с.
- 53.Термические константы веществ. Под ред. акад. В.П. Глушко. Вып. X. М.: Изд-во ВИНТИ, 1982.
- 54.Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352с.
55. Хилл Т. Статистическая механика. Принципы и избранные приложения / Пер. с англ. М.: ИИЛ, 1960.
56. Семенов А.М., Шпильрайн Э.Э. Уравнение состояния химически реагирующего газа. В сб.: «Уравнение состояния газов и жидкостей» Под. ред. И.И. Новикова. М.: Наука, 1976. С. 77.
57. Мозговой А.Г., Попов В.Н., Фокин Л.Р. Термодинамические свойства паров цезия при температурах до 1700 К и давлениях до 5.2 МПа. Препринт ОИВТ РАН № 1-463. М., 2002. 45 с.