

УДК 539.17:541.121.124

Химические системы для получения трития в термоядерной энергетике

ВАСИЛЬЕВ В. Г.

Для получения трития — основного компонента дейтерий-тритиевого топлива в термоядерном реакторе (ТЯР) — предполагается использовать литиевые материалы двумя способами, оптимизации которых в настоящее время уделяется большое внимание [1—3]. Первый способ — ТЯР служит источником нейтронов, которые используются для воспроизводства трития, при этом в литиевой зоне бланкета (экрана) реактора создаются условия, необходимые для получения трития и его выделения. Второй способ — ТЯР используется для получения энергии и ядерного топлива в гибридном варианте и потребляет тритий, который производится в реакторах деления. Это производство возможно осуществить при использовании симбиозной системы [3], в которой предполагается применять расплавленные соли, или при облучении твердых литиевых материалов [4—6].

Существует два варианта использования литиевых материалов: длительное облучение для накопления трития или непродолжительное облучение для выделения трития в самом реакторе [7]. Следовательно, для получения трития из литиевых материалов можно рассматривать две химические системы — закрытую и открытую.

В закрытой системе не происходит массообмена с другими системами, но она получает и отдает энергию. Литиевый материал находится в герметичном сосуде и получает энергию, которая отво-

дится за счет теплопередачи. Термодинамический потенциал стремится к минимальному значению, и ΔG отрицательно.

В открытой системе происходит обмен с другими системами как веществом, так и энергией, т. е. в ней могут изменяться и масса, и энергия. Система не достигает равновесия; процесс происходит до тех пор, пока система изменяет свои массу или энергию (или массу и энергию). В открытой системе происходит выведение из системы продуктов ядерной реакции и радиолиза.

Рассмотрим связь между количеством трития, накапливаемым в 1 см^3 литиевого материала, и временем облучения при плотности потока нейтронов 10^{13} нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ и коэффициенте эффективности 0,1 (табл. 1). Первые сутки работы термоядерного реактора характеризуются концентрацией трития в литиевых материалах $\sim 10^{-2} - 10^{-4} \text{ мг/см}^3$. Накопление оптимального количества трития в литиевых материалах, облучаемых в реакторах деления, возможно в течение нескольких месяцев [3].

При содержании трития $\sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ мг/см}^3$ литиевого материала для закрытой системы можно говорить о существовании самостоятельной фазы тритида лития (при облучении металлического лития или его сплавов с другими металлами) либо растворов тритиевой воды в исходных кристаллических соединениях лития. Следовательно, закрытую систему нужно проанализировать с точки зрения равновесного состояния по отношению к фазам, содержащим тритий в той или иной химической форме.

Для равновесной химической системы используем известное правило фаз $C = K - \Phi + n$ (C — число термодинамических степеней свободы системы, определяющее наибольшее число факторов, которые могут изменяться независимо один от другого, т. е. число независимых параметров, полностью определяющих состояние системы при равновесии; K — число независимых компонентов системы, участвующих в образовании химических соединений; Φ — число фаз; n — число внешних факторов, влияющих на положение равновесия в данной системе. Составные части системы определяет K , которое может быть принято равным числу химических элементов, входящих в состав соединения, плюс тритий, образующийся

Таблица 1

Время облучения лития для получения необходимой концентрации трития

| Количество трития в 1 см^3 | | Количество выгоревшего лития при плотности $0,5 \text{ г/см}^3$, мас. % | Время облучения, сут |
|--------------------------------------|-------------------|--|----------------------|
| мг | атом | | |
| 10^{-4} | $2 \cdot 10^{16}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ | 0,23 |
| 10^{-3} | $2 \cdot 10^{17}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | 2,3 |
| 10^{-2} | $2 \cdot 10^{18}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ | 23 |
| 10^{-1} | $2 \cdot 10^{19}$ | $4 \cdot 10^{-2}$ | 230 |
| 1 | $2 \cdot 10^{20}$ | $4 \cdot 10^{-1}$ | 2300 |
| 10 | $2 \cdot 10^{21}$ | 4 | — |

Продукты термической диссоциации и радиационно-химических процессов в литиевых соединениях

| Химическое соединение | Термическая диссоциация | Температура | Продукты радиолитиза | Источник |
|----------------------------------|--|--|---|-------------------------|
| LiH | $LiH \rightarrow Li + 0,5 H_2$ | 500 °C | Коллоидный литий, водород | [9—11] *, [12, 13] ** |
| LiAlH ₄ | $LiAlH_4 \rightarrow LiAlH_2 + H_2$ $LiAlH_2 \rightarrow LiH + Al + 0,5 H_2$ | 180—240 °C 230—280 °C 370—480 °C | Коллоидный литий, водород | [14—17] *, [18] ** |
| LiNO ₃ | $LiH \rightarrow Li + 0,5 H_2$ $LiNO_3 \rightarrow LiNO_2 + 0,5 O_2$ | | Окись Li ₂ , LiNO ₂ , N ₂ , O ₂ | [19—21] *, [22—24] ** |
| LiNO ₂ | $LiNO_2 \rightarrow 0,5 Li_2O + 0,5 NO + 0,5 NO_2$ | | | [25] * |
| Li ₂ C ₂ | $Li_2C_2 \rightarrow 2Li + 2C$ | 600 °C | Литий, графит *** | [26, 27] *, [28, 29] ** |
| LiF | LiF испарение $LiF \rightarrow Li + 0,5 F_2$ | 800 °C 1300 °C | Коллоидный литий, фтор | |
| Li ₂ O | Li ₂ O испарение $Li_2O \rightarrow LiO, Li, O_2$ | 1000 °C 1400 °C | Li, O ₂ *** | [30—33] * |
| LiAlO ₂ | $LiAlO_2 \rightarrow Li + 0,5 Al_2O_3 + 0,25 O_2$ | 1400 °C | Li, O ₂ *** | [34—36] * |
| Li ₂ SO ₄ | Li ₂ SO ₄ → испарение $Li_2SO_4 \rightarrow Li_2O + SO_2 + 0,5 O_2$ | 600 °C | SO ₃ , SO ₂ , O ₂ | [37—39] *, [40—43] ** |
| Li ₂ SiO ₃ | Li ₂ SiO ₃ → испарение | | | |
| Li ₄ SiO ₄ | $Li_2SiO_3 \rightarrow Li_2O + SiO_2$ | | Li, Si, O ₂ *** | |

* По термической диссоциации.
** По радиолитизу.
*** Предположение.

в системе. Число фаз можно предсказать, определив значение n . На рассматриваемые системы воздействуют давление, температура и радиация (γ -излучение, нейтроны и «горячие» частицы — гелий и тритий).

Температурный режим облучения литиевых материалов с учетом конструкции ампулы, распределения нейтронов по материалу в зависимости от концентрации в нем ⁶Li, теплофизических свойств и состава газовой фазы является предметом самостоятельного исследования. Если сопоставить результаты воздействия различных видов радиации и высоких температур на химические соединения лития, то следует отметить идентичность образующихся продуктов (табл. 2). Вероятно, механизм образования продуктов диссоциации химических соединений при нагревании и под действием горячих частиц идентичен, поскольку в треках тяжелых частиц гелия и трития наблюдается высокая температура [8]. Для металлических систем действие радиации не приводит к образованию химических продуктов радиолитиза, кроме продуктов ядерной реакции гелия и трития. Следовательно, число n можно принять равным 2, и для закрытых систем с литиевыми материалами под действием нейтронного облучения правило фаз записывается в виде $C = K - \Phi + 2$. На равновесие в системе влияют только два внешних фактора — температура и давление.

Результаты расчетов числа фаз и состава литиевых систем для двух-, трех- и многокомпонентных систем при различных значениях C показаны в табл. 3. Для металлического лития и систем на

его основе характерно образование тритида лития, который рассматривается в системе литий — гидрид лития в работах [44—46]; для сплавов лития с алюминием наиболее вероятно образование трехфазной системы [47].

У трехкомпонентных систем, образующихся при облучении LiF; Li₂O и Li₂C₂, вероятно образование систем с тремя или четырьмя фазами. Для LiF наиболее вероятно образование системы с коллоидным литием; так, соединение LiF·HF диссоциирует при температуре ~200°C [48].

Для систем с числом компонентов более трех (при облучении Li₂SO₄, LiAlO₂ и др.) наиболее вероятно число степеней свободы, равное двум, так как при этом возможно образование твердых растворов воды с исходным веществом. Для Li₂SO₄ число фаз равно четырем, что подтверждается результатами исследований систем Li₂SO₄ — SO₃ и Li₂SO₄ — H₂O — SO₃ [49—51].

Увеличение числа компонентов в системе отражается на перераспределении трития между образующимися фазами, число которых также увеличивается. Для кислородных соединений лития, содержащих в своем составе Li₂O, Al₂O₃, SiO₂ и другие окислы, окись трития будет распределяться между этими составляющими.

Приведенные рассуждения дают представление об образовании новых фаз и химическом состоянии трития в закрытых системах, находящихся под действием радиации. Количественные соотношения можно найти при помощи термодинамики с учетом конкретных систем и условий их облучения, которые изменяются во времени.

Таблица 3

Число и состав фаз для закрытых систем с литием и литиевыми соединениями

| Система | Число компонентов К | Число степеней свободы С | Число фаз Ф | Состав фаз (предположительный) | Система | Число компонентов К | Число степеней свободы С | Число фаз Ф | Состав фаз (предположительный) |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------|-------------|---|------------------------------------|---------------------|--------------------------|-------------|---|
| Li—T | 2 | 0 | 4 | Газовая фаза Твердая фаза: литий, тритид лития Жидкая фаза | Li ₂ O—T | 3 | 0 | 5 | Газовая фаза Твердая фаза: Li ₂ O, LiOT, LiO; Жидкая фаза |
| | | 1 | 3 | Газовая фаза Твердая фаза: литий, тритид лития | | | 1 | 4 | Газовая фаза Твердая фаза: Li ₂ O, LiOT, LiO |
| | | 2 | 2 | Газовая фаза Твердая фаза: твердый раствор тритида лития в литии | | | 2 | 3 | Газовая фаза Твердая фаза: Li ₂ O, LiOT |
| Li—Al (сплав до 3 мас. % лития)—T | 3 | 0 | 5 | Газовая фаза Твердая фаза: LiAl в α-фазе, LiAl в β-фазе, тритид лития Жидкая фаза | Li ₂ SO ₄ —T | 4 | 0 | 6 | Газовая фаза Твердая фаза: Li ₂ SO ₄ , твердый раствор T ₂ O в Li ₂ SO ₄ , твердый раствор SO ₃ в Li ₂ SO ₄ ,... Жидкая фаза |
| | | 1 | 4 | Газовая фаза Твердая фаза: LiAl в α-фазе, LiAl в β-фазе, тритид лития | | | 1 | 5 | Газовая фаза Твердая фаза: твердый раствор T ₂ O в Li ₂ SO ₄ , твердый раствор SO ₃ в Li ₂ SO ₄ , Li ₂ SO ₄ , твердый раствор T ₂ O и SO ₃ в Li ₂ SO ₄ |
| | | 2 | 3 | Газовая фаза Твердая фаза: LiAl в α-фазе, тритид лития | | | 2 | 4 | Газовая фаза Твердая фаза: Li ₂ SO ₄ , твердый раствор T ₂ O в Li ₂ SO ₄ , твердый раствор SO ₃ в Li ₂ SO ₄ . |

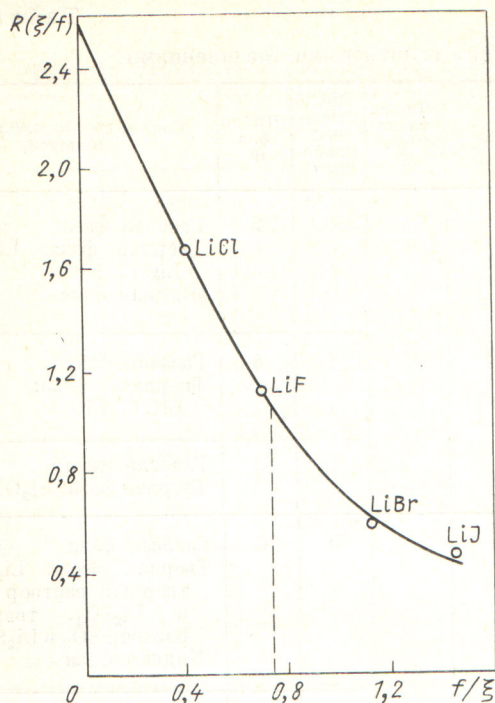
Смещение равновесия (вывод части продуктов системы) осуществляется вакуумированием с помощью газа-носителя и в результате химических реакций со стенками ампулы или различного рода поглотителями. При этих условиях система рассматривается как открытая. Открытыми системами можно считать литиевые материалы, облучаемые в первые часы и сутки работы термоядерного реактора и реактора деления. Опубликованные экспериментальные данные [52] о свойствах облученных неорганических соединений лития (кинетика выделения трития и гелия, химические формы трития в облученных соединениях лития, продукты радиолитиза) относятся к начальным стадиям облучения. Эти данные в сочетании с данными о термических свойствах соединений необходимы для описания открытых систем.

Химические формы трития, образующегося в литиевом материале, в результате ядерной реакции могут быть предсказаны на основе ядерной химии горячих частиц. Замедление горячих ато-

мов в области энергии, в которой не происходит их реакции, подчиняется закономерностям, вытекающим из предположения о столкновении упругих частиц. В таком случае для расчета спектра замедления используют уравнения, описывающие процесс термализации нейтронов [53]. Реакции атомов отдачи трития протекают путем прямого одноступенчатого взаимодействия атома отдачи с отдельными атомами, а точнее с химическими связями. Для расчета выхода индивидуального меченого соединения из двухкомпонентной системы предложено выражение [54, 55]

$$R_{ij} = (f/\xi) I - (f^2/\xi^2) K,$$

где f — геометрическая вероятность соударения; ξ — средний логарифмический декремент энергии. Расчеты, выполненные для галогенидов лития с использованием экспериментальных данных по выходу трития R из этих соединений [18], показаны на рисунке. Видно, что строгая линейная зависимость $R (\xi/f)$ от f/ξ не выполняется. Однако



Зависимость R от f/ξ для различных соединений: — — — Li_2BeF_4 ; \circ — эксперимент

для Li_2BeF_4 можно определить R , рассчитав f и ξ . Расчеты показывают, что 70—80% трития будет выделяться в виде T_2 , остальная часть в виде TF .

Термическая устойчивость литиевых материалов рассматривается на примере азотнокислых, сернокислых и фторидных соединений, некоторые из которых составляют основу расплавов, предлагаемых к использованию в реакторах. Здесь следует подчеркнуть связь термической и радиационно-химической устойчивости. При определенной температуре скорость термической диссоциации будет превышать скорость радиолитического распада, так как рекомбинационные процессы для продуктов радиолитического распада играют значительную роль в результате отжига дефектов. При этом скорость зарождения продуктов диссоциации термическим путем будет больше скорости их радиационного зарождения, т. е. $G_0 I < (N/M) K_0 \exp(-E/RT)$. На примере LiNO_3 можно показать, что при $E = 15,8$ ккал/моль, $K_0 = 1,25 \cdot 10^{-1}$, $G_0 = 5,5$ ион/100 эВ и мощности $I = 10^{18}$ эВ/(г·с), при которой вещество не нагревается выше 100°C , $T > E/(2,3R \lg K_0 N/MIG_0)$. При $\sim 500^\circ\text{C}$ химическое действие излучения при разложении LiNO_3 значительно меньше, чем термическое.

Для сульфатных систем лития, содержащих BeSO_4 , следует отметить аналогичные закономер-

Таблица 4

Зависимость $\lg P_{\text{нас}} = f(T)$ и средние значения теплоты испарений

| Соединение и состав, мол.% | Температура, К | Метод измерения | $\lg P_{\text{нас}} = f(T)$, мм рт. ст. | Теплота испарения, ккал/моль | |
|-----------------------------------|----------------|-----------------|---|------------------------------|-----------------------|
| | | | | Эксперимент | Опубликованные данные |
| LiF | 833—1133 | Ленгмюр | $\lg P = -\frac{11,85 \cdot 10^3}{T} + 8,34$ | $54,3 \pm 4,0$ | 58,27 [26] |
| | | Кнудсен | $\lg P = -\frac{13,41 \cdot 10^3}{T} + 10,65$ | $61,0 \pm 4,0$ | 67,6 [26] |
| BeF_2 | 833—1033 | Ленгмюр | $\lg P = -\frac{9,60 \cdot 10^3}{T} + 7,62$ | $44 \pm 3,0$ | 47—55 [64—65] |
| | | Кнудсен | $\lg P = -\frac{8,8 \cdot 10^3}{T} + 8,17$ | $40,5 \pm 3,0$ | |
| LiF — NaK — KF 46,5—11,5—42 | 833—1133 | Ленгмюр | $\lg P = -\frac{9,25 \cdot 10^3}{T} + 6,65$ | $42,4 \pm 4,0$ | |
| | | Кнудсен | $\lg P = -\frac{10,6 \cdot 10^3}{T} + 9,25$ | $48,6 \pm 4,0$ | |
| LiF — BeF_2 50—50 | 833—1033 | Кнудсен | $\lg P = -\frac{9,62 \cdot 10^3}{T} + 7,96$ | $44,0 \pm 3,0$ | |
| | | Ленгмюр | $\lg P = -\frac{8,70 \cdot 10^3}{T} + 6,40$ | $40 \pm 4,0$ | |
| LiF — BeF_2 66,7—33,3 | 833—1033 | Кнудсен | $\lg P = -\frac{9,6 \cdot 10^3}{T} + 8,37$ | $44,0 \pm 3,0$ | |
| | | Ленгмюр | $\lg P = -\frac{8,2 \cdot 10^3}{T} + 5,14$ | $37,5 \pm 2,0$ | |

Состав фаз после испарения в вакууме фторидных систем

Таблица 5

| Система и состав, мол. % | Образец | Температура испарения, °С | Потеря массы, % | Состав, мас. % | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------|---------------------|-----------|
| | | | | Li | Na | K |
| LiF—BeF ₂ 50 50 | Исходный состав Твердый остаток | 560 | 5,72 | Li 9,6 11,0 | Be 12,32 12,4 | |
| LiF—BeF ₂ 66,6 33,4 | Исходный состав | 660 | 6,35 | 14,15 | 9,09 | |
| | Твердый остаток | 660 | 7,28 | 14,64 | 9,45 | |
| | То же | 760 | 20,2 | 15,94 | 9,09 | |
| | » » | 760 | 27,9 | 12,2 | 7,54 | |
| LiF—NaF—KF 46,5 11,5 42 | Исходный состав | 660 | | Li 7,91 | Na 6,41 | K 39,7 |
| | Твердый остаток | 660 | 11,3 | 8,4 | 7,5 | 40,7 |
| | То же | 660 | 25,0 | 9,3 | 8,1 | 33,6 |
| | Конденсат | 660 | | 3,16 | 1,6 | 53,5 |

ности. В системе Li₂SO₄—BeSO₄ существует эвтектика (38 мол. % BeSO₄) с температурой плавления 480 ± 5° С [56, 57]. Исследования равновесного давления газообразных продуктов диссоциации, кинетики термической диссоциации, эвтектики и BeSO₄ [58—60] показали, что расплав эвтектики термически устойчив в вакууме до 600° С. Отжиг продуктов γ-радиолиза в этих соединениях происходит до 500° С [43].

Расплавы эвтектических составов в системах LiK/SO₄, LiNa/SO₄ и LiNaK/SO₄ имеют высокую термическую устойчивость, так как соли, входящие в данные системы, термически стабильны до 1000° С [39]. Анализ возгонов и остатка расплава после испарения 7 и 20 мас. % эвтектики LiNaK/SO₄ (900° С) показал, что соотношение щелочных металлов не изменяется и обеднения расплава по сульфат-иону не происходит. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в этих системах возможен перенос массы вещества путем испарения, а действие радиации в условиях открытых систем приводит к диссоциации и удалению газообразных продуктов (O₂, SO₂, SO₃) [42, 43].

Массоперенос во фторидных системах LiNaK/F, LiBe/F становится значительным, так как компоненты, входящие в их состав, имеют высокую летучесть [61—65].

Для фторидных систем исследовали скорость испарения с открытой поверхности (тигель платиновый) и из эффузионной камеры (никель, медь; коэффициент Клаузинга 0,8). Результаты расчетов давления насыщенных паров приведены в табл. 4. Фтористый бериллий получали термическим разложением фторбериллата аммония в вакууме [62, 63]. При этом происходило изменение состава расплава, что иллюстрируется данными табл. 5. Приведенные свойства фторидных систем могут осложнить выделение из них трития, так как возможен случай сближения скорости испарения материала и скорости извлечения трития.

Большая часть неорганических термически устойчивых соединений лития лишена отмеченных выше недостатков и представляется более предпочтительной для применения в открытых системах благодаря таким качествам, как низкая упругость паров, радиационная устойчивость и безопасная работа в реакторе [66]. Однако имеются экспериментальные данные [67], показывающие летучесть окиси лития при температуре выше 1000°С, особенно в присутствии воды.

Предложенная классификация химических систем позволяет найти взаимосвязь между ними при рассмотрении их в процессе облучения во всем диапазоне доступных концентраций трития в литиевых материалах. В табл. 6 показана взаимосвязь систем и условий их существования. При кон-

Таблица 6

Химические системы в процессе облучения

| Характеристика системы | Число выгоревших атомов ⁶ Li в 1 см ³ | Количество образовавшегося трития | |
|------------------------|---|-----------------------------------|--------------------|
| | | мг/см ³ | Ки/см ³ |
| Открытая система * | 2·10 ¹⁵ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁴ |
| | 2·10 ¹⁶ | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻³ |
| | 2·10 ¹⁷ | 10 ⁻³ | 10 ⁻² |
| Переходная область ** | 2·10 ¹⁸ | 10 ⁻² | 10 ⁻¹ |
| | 2·10 ¹⁹ | 10 ⁻¹ | 1 |
| Закрытая система *** | 2·10 ²⁰ | 1 | 10 |
| | 2·10 ²¹ | 10 | 100 |

* Далекая от состояния равновесия.

** Образование фаз, изменение структуры, влияние гелия на механические свойства материала, нарушение материала.

*** Переход к равновесному состоянию, образование газообразных и твердых фаз, содержащих тритий.

центрации трития в материале менее 10^{-1} Ки/см³ систему можно считать открытой, находящейся далеко от состояния равновесия, при концентрации трития более 1 Ки/см³ — закрытой и стремящейся к равновесию. Границы переходной области показаны условно, так как от свойств литиевого материала, условий облучения и свободного объема зависит переход системы из открытой в закрытую.

Открытые неравновесные системы могут быть использованы в зоне воспроизводства трития blankets ТЯР при организации непрерывного способа получения трития, преимущества которого для ТЯР описаны в работе [7]. Для описания открытых систем необходимо изучение химии трития при его низких концентрациях (10^{-1} — 10^{-2} Ки/г) в литиевых материалах, поведения гелия, продуктов радиолиза и их свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велихов Е. П. и др. В кн.: Докл. Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Т. 1. Л., изд. ГКИАЭ, НИИЭФА, 1977, с. 5.
2. Price W. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1977, v. 27, p. 78.
3. Блинкин В. Л., Новиков В. М. Препринт ИАЭ-2849, М., 1977.
4. Способ непрерывного производства трития. Пат. Чехословакии № 103871, опубл. 15.06.62.
5. Патент США № 3079317, Кл. 204-154.2, опубл. 26.02.63.
6. Патент Японии № 030998, Кл. CO 1B4/00G21G, опубл. 20.03.74.
7. Васильев В. Г. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 5, с. 440.
8. Динс Дж., Виниард Дж. Радиационные эффекты в твердых телах. М., Изд-во иностр. лит., 1960, с. 47.
9. Херд Д. Введение в химию гидридов. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
10. Шпильрайн Э. Э., Якимович К. А. В кн.: Гидрид лития. М., Изд. стандартов, 1972.
11. Ihle H., Wu Ch. «J. Inorg. Nucl. Chem.», 1974, v. 36, p. 2167.
12. Pretzel F. E. e.a. «J. Phys. Chem. Solids», 1962, v. 19, N 14, p. 325.
13. Андроникашвили Э. Л. и др. В кн.: Ядерно-химические явления в твердых телах. Тбилиси, Изд-во Мецниереба, 1968, с. 68.
14. Михеева В. Л. и др. «Докл. АН СССР», 1956, т. 109, с. 439.
15. Block J., Gray A. «J. Inorg. Nucl. Chem.», 1965, v. 4, N 3, p. 304.
16. Aronson S., Salzano E. Ibid., 1969, v. 8, N 7, p. 1541.
17. McCarty M. e.a. «J. Phys. Chem.», 1968, v. 72, N 12, p. 4009.
18. Costea T., Mantescu C. «J. Inorg. Nucl. Chem.», 1966, v. 28, p. 2777.
19. Hardy C., Field B. «J. Chem. Soc.», 1963, v. 11, p. 5130.
20. Brichler A., Stanfer J. «J. Phys. Chem.», 1966, v. 70, p. 4092.
21. Бордюшкова Е. А. и др. «Журн. прикладной химии», 1963, т. XI, № 7, с. 1438.
22. Захаров Ю. А., Невоструев В. А. «Успехи химии», 1968, т. 37, № 1, с. 143.
23. Hochandel C. «Rad. Res.», 1962, v. 16, p. 286.
24. Ward T. e.a. Ibid., 1968, v. 33, p. 447, 456.
25. Остроушко Ю. И. и др. В кн.: Литий, его химия и технология. М., Атомиздат, 1960, с. 52.
26. Hildenbrand D. L. e.a. «J. Chem. Phys.», 1964, v. 40, p. 2882.
27. Bertkowitz J. e.a. Ibid., 1962, v. 36, p. 2170.
28. Джорджишвили Л. И. и др. В кн.: Электронные процессы в твердых телах. Т. 2, Тбилиси, Изд-во Менисереба, 1965, с. 19.
29. Шварц К. К., Эжманис Ю. А. В кн.: Радиационная физика. Т. 4, Рига, Изд-во Зинатне, 1966, с. 111.
30. Несмеянов А. Н., Белых Л. П. «Журн. физ. химии», 1960, т. 34, с. 841.
31. Berkowitz J. e.a. «J. Phys. Chem.», 1959, v. 63, p. 644.
32. Brewer L., Margrave J. Ibid., 1955, v. 59, p. 421.
33. Klewm W., Scharf H. «Z. anorgan. Chem.», 1960, v. 303, p. 236.
34. Попков О. С., Семенов Г. А. «Журн. физ. химии», 1971, т. 45, с. 476.
35. Hildenbraud D. e.a. «J. Chem. Phys.», 1963, v. 39, p. 2463.
36. White D. e.a. Ibid., 1963, v. 39, p. 296.
37. Powell D., Wyatt P. «J. Chem. Soc. A», 1971, p. 3614.
38. Halstead W. «Trans. Faraday Soc.», 1970, v. 66, p. 1966.
39. Васильев В. Г., Дмитриевская Е. В. «Журн. физ. химии», 1973, т. 47, с. 2715.
40. Neal H. J. «Trans. Faraday Soc.», 1958, v. 54, p. 1535.
41. Громов В. В., Карасева Л. Г. «Химия высоких энергий», 1967, т. 1, с. 51.
42. Карасева Л. Г. и др. Там же, 1968, т. 2, с. 562.
43. Васильев В. Г., Вашман А. А. Там же, 1974, т. 8, с. 349.
44. Veleckis E. e.a. «J. Less-Common Metals.», 1977, v. 55, p. 85.
45. Veleckis E. «J. Phys. Chem.», 1977, v. 81, p. 526.
46. Smith F. J. e.a. In: Proc. Conf. «Radiation Effects and Tritium Technology for Fusion Reactors.» Gatlinburg, 1—3 Okt. 1973. V. 111, p. 539.
47. Owen J. H., Randall D. Ibid., p. 433.
48. Остроушко Ю. И. и др. [25], с. 63.
49. Спицын В. И., Михайленко И. Е. «Журн. неорг. химии», 1957, т. 2, с. 246; 1958, т. 3, с. 526.
50. Васильев В. Г. и др. Там же, 1975, т. 20, с. 2875.
51. Васильев В. Г. Там же, 1975, т. 49, с. 1851.
52. Васильев В. Г., Дмитриевская Е. В. Тритий в неорганических соединениях лития. М., изд. ВНИИНМ, 1976.
53. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
54. Филатов Э. С., Несмеянов А. Н. «Вестн. МГУ. Сер. хим.», 1964, т. 4, с. 13.
55. Филатов Э. С. и др. «Радиохимия», 1964, т. 4, с. 595.
56. Босик П. И. и др. «Журн. неорг. химии», 1961, т. 6, с. 256.
57. Васильев В. Г. и др. Там же, 1974, т. 19, с. 1601.
58. Васильев В. Г., Ершова З. В. Там же, 1972, т. 17, с. 631.
59. Васильев В. Г., Дмитриевская Е. В. «Журн. физ. химии», 1973, т. 47, с. 2715.
60. Васильев В. Г., Ершова З. В. Там же, 1972, т. 46, с. 2958.
61. Powers W. D. e.a. «Nucl. Sci. Engng», 1963, v. 17, N 2, p. 200.
62. Васильев В. Г., Марков В. С. «Журн. неорг. химии», 1976, т. 21, с. 3215.
63. Васильев В. Г. «Журн. физ. химии», 1975, т. 45, с. 1850.
64. Хандрамова Н. Э. и др. «Журн. неорг. химии», 1959, т. 4, с. 2192.
65. Белоусов В. И. и др. «Журн. физ. химии», 1967, т. 41, с. 2969.
66. Vasiliev V. G. In: Proc. US-USSR Symp. on Fusion-Fission Reactors. Livermore, 13—16 July 1976.
67. Ван Аркель и др. В кн.: Литий. М., Изд-во иностр. лит., 1959, с. 56.