УДК 621.039

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИТИЯ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

*И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, В.А. Евтихин (ФГУП «Красная Звезда»)*

Длительное время литий, как элемент с малым атомным номером, концептуально рассматривался в качестве одного из возможных материалов, контактирующих с плазмой токамака. Эксперименты прошедшего десятилетия с использованием лития, успешно проведенные на термоядерных установках TFTR, T-11M, T-10, CDX-U, FTU, дали результаты, позволяющие с оптимизмом рассматривать создание внутрикамерных приемных устройств токамака на основе жидкого лития как один из путей решения существующих проблем, стоящих при разработке проектов реактора ДЕМО и в дальнейшем энергетического термоядерного реактора. Поскольку в существующих проектах ТЯР жидкий литий рассматривается, кроме прочего, и как тритийвоспроизводящий материал, и как теплоноситель, необходимо располагать базой данных по всему комплексу свойств этого металла, на основе анализа которой можно принимать обоснованные решения по использованию лития. Краткий анализ комплекса свойств лития и экспериментальных данных по использованию в токамаках приведен в настоящей работе.

PHYSICAL-CHEMICAL BASIS OF LITHIUM USE IN LIQUID METAL SYSTEMS OF FUSION REACTOR. I.E. LYUBLINSKI, A.V. VERTKOV, V.A. EVTIKHIN. Lithium as an element with a low atomic number has been considering for a long time in terms of concept among possible tokamak plasma facing materials. Experiments of past ten years with lithium aplication to be successfully conducted on the TFTR, T-11M, T-10, CDX-U, FTU fusion facilities gave results which allowed a creation of tokamak in-vessel target plates based on liquid lithium to be optimistically considered as one way of solving the available problems on development of DEMO reactor projects and further power fusion reactor. Since liquid lithium is considered also as a tritium breeding material and a coolant in the fusion reactor existing projects it is necessary to have a data base on the whole complex of this material properties. Proceeding from the data base analysis, a well-founded decision on lithium aplication can be taken. A short analysis of lithium property complex and experimental data on its use in the tokamaks is presented in this work.

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТИЯ

**Основные физические свойства.** Уникальные свойства лития являются основой возможности его использования как элемента, контактирующего с плазмой токамака, и кондиционирующего плазму, а также в качестве тритийвоспроизводящего материала и теплоносителя бланкета термоядерного реактора [1—4]. Свойства лития изучались длительное время и как собственно химического элемента, открытого в 1817 г., и как металла — эффективного теплоносителя тепловых труб и ядерных энергетических установок. Поэтому они в достаточной степени изучены [5—13], хотя и уточняются до настоящего времени. Следует отметить, что рассматриваемые свойства в значительной степени зависят от чистоты лития, наличия остаточных газов в вакуумной среде, в которой эти свойства определялись. Исследования этих факторов проводились, но далеко не всегда их можно учесть с достаточной точностью. Это необходимо учитывать при анализе имеющихся экспериментальных данных и использовании их в практической работе.

При рассмотрении комплекса свойств лития упор был сделан не на анализ достаточно развитых вопросов теории процессов и явлений, а на их прикладную сторону.

Литий является типичным металлом. Наиболее важной характеристикой лития как легкоплавкого металла является его температура плавления 180,54 ºС. Температура кипения лития при нормальном давлении равна 1343 ºС. Таким образом, литий имеет широкий диапазон жидкого состояния, что важно при его использовании в энергетических системах.

Твердый литий на свежем срезе имеет серебристо-белый цвет, который может меняться в зависимости от наличия в нем примесей или в процессе взаимодействия со средой (вакуум, инертный газ и др.).

Литий обладает парамагнитными свойствами. При комнатной температуре его магнитная восприимчивость $\chi$ составляет $3{,}35\cdot10^{9}$ м$^3$/кг. Соединения лития являются парамагнетиками.

Коэффициент теплового излучения лития $\varepsilon_T$ обычно принимается равным 0,05. Однако его значение сильно зависит от состояния (загрязнения) излучающей поверхности.

При температуре выше –200 ºС литий имеет объемно-центрированную кубическую структуру, а при более низкой температуре появляются фазы с ГПУ- и ГЦК-модификациями кристаллической решетки. При 20 ºС литий характеризуется следующими значениями механических свойств: модуль упругости 5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,42, предел прочности 115 ГПа, полное относительное удлинение 50—70%. С ростом температуры прочностные свойства резко падают, а пластичность растет. Хотя литий прочнее других щелочных металлов, он легко поддается деформированию. Поскольку температура его рекристаллизации ниже 20 ºС, при обработке прессованием и волочением не происходит его упрочнения. Изотермическая сжимаемость лития при 600 ºС составляет $1{,}1\cdot10^{-10}$, при 1000 ºС — $1{,}5\cdot10^{-10}$ Па$^{-1}$. Атомная масса природного лития, содержащего 7,42% $^6$Li (остальное $^7$Li), составляет 6,941 а.е.м. Литий имеет валентную конфигурацию (основной терм) 2s—$^2S_{1/2}$. Потенциалы ионизации лития относительно высоки: I — 5,3918, II — 75,641 и III — 122,45 эВ.

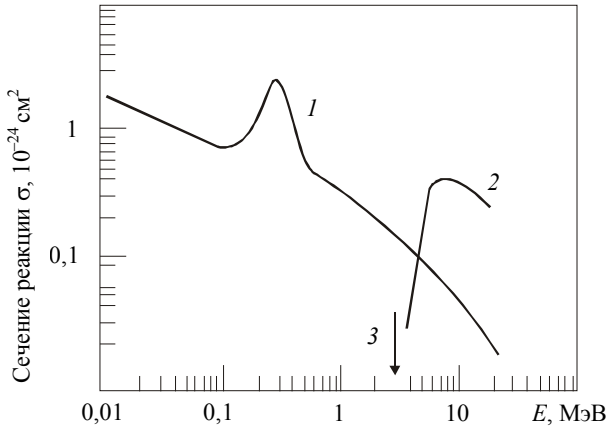



Рис. 1. Сечения реакций $^6$Li($n$, $\alpha$)T (*1*) и $^7$Li($n$, $n'$, $\alpha$)T (*2*) в зависимости от энергии нейтронов; *3* — пороговая энергия реакции $^7$Li($n$, $n'$, $\alpha$)T

Существенными с точки зрения обслуживания литиевых систем будущих термоядерных энергетических установок являются степень и характер активации жидкого металла. В литиевых системах реактора будет нарабатываться тритий — β-активный нуклид с периодом полураспада $3{,}9\cdot10^{8}$ с, являющийся необходимым компонентом топливного цикла термоядерного реактора. Сечения реакций образования трития на $^6$Li и $^7$Li в зависимости от энергии нейтронов приведены на рис. 1.

Наведенная активность лития при облучении нейтронами практически отсутствует, так как образующиеся радионуклиды $^8$Li, $^9$Li и $^{11}$Li обладают периодом полураспада 0,842, 0,176 и 0,0085 с соответственно. Поэтому активация лития в реакторе будет определяться наличием в нем примесей. Примеси мо-

гут присутствовать в исходном материале и поступать из плазмы, защитной атмосферы (вакуум, инертные газы) и как продукты взаимодействия жидкого лития с конструкционными и служебными материалами.

Литий является самым легким из металлов. Плотность природного лития при 20 ºС составляет 0,5316 ± 0,0011, плотность $^6$Li 0,460 ± 0,001 и $^7$Li 0,537 ± 0,003 г/см$^3$.

Зависимость плотности лития $d$, кг/м$^3$, от температуры в твердом состоянии описывается уравнением, определяющим характер изменения плотности твердых тел:

$$d = 533(1 + 1{,}8\cdot 10^{-4}t)^{-1}, \qquad (1)$$

где $t$ — температура, ºС.

Коэффициент термического расширения лития при 25 ºС составляет $47\cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. При плавлении объем лития увеличивается на 1,5%. Теплота плавления лития в расчете на единицу массы составляет 432,08, Дж/г. В расчете на моль вещества теплота плавления для лития равна 2999 Дж/моль. Изменение плотности лития выше температуры плавления описывается по результатам совместной обработки имеющихся экспериментальных данных с учетом их статистических весов уравнением

$$d = 540{,}43 - 0{,}02729(t + 273{,}2) - 8{,}0035\,(t + 273{,}2)^2 10^{-5} + 3{,}799(t + 273{,}2)^3 10^{-8}. \qquad (2)$$

При увеличении температуры от 25 до 1000 ºС удельный объем лития возрастает примерно на 20%, что необходимо учитывать при конструировании литиевых систем.

**Термодинамические свойства конденсированной и паровой фазы.** Критические параметры — одна из основных характеристик вещества. Для лития они были определены различными авторами. Критическая температура для лития составляет 3210 ºС, давление 60 МПа, плотность 126 кг/м$^3$ и критический фактор сжимаемости 0,11.

Скорость звука в твердом состоянии вблизи точки плавления составляет 4860 м/с. Выше температуры плавления и до 800 ºС температурная зависимость скорости звука (м/с) описывается выражением

$$a = 4783{,}4 - 0{,}5884T, \qquad (3)$$

где $T$ — температура, К.

Давление насыщающих паров жидкого лития $P$, Па, для интервала температур 800—1400 ºС с остаточной точностью определяется выражением

$$\lg P = 12{,}4037 - 8283{,}1/T - 0{,}7081\cdot \lg T, \qquad (4)$$

Значения давления насыщения паров лития приведены в табл. 1.

Теплоемкость $C_p$ (Дж/(К·моль)) и энергия Гиббса $G$ (кДж/моль) лития в твердом состоянии описываются выражениями

$$C_p = 1{,}309 + 56{,}287\cdot 10^{-3}T + 0{,}602\cdot 10^6 T^{-2}; \qquad (5)$$

$$G = 3758 - 1{,}309\cdot T\ln T - 0{,}301\cdot 10^6 T^{-1} - 6{,}954T - 28{,}144\cdot 10^{-3}T^2, \qquad (6)$$

а в жидком состоянии до температуры 2700 ºС выражениями

$$C_p = 31{,}227 + 0{,}205\cdot 10^6 T^{-2} - 5{,}265\cdot 10^{-3}T + 2{,}628\cdot 10^6 T^{-2}; \qquad (7)$$

$$G = -1437 - 31{,}227T\ln T - 0{,}102\cdot 10^6 T^{-1} - $$
$$- 172{,}678T + 2{,}633\cdot 10^{-3}T^2 - 0{,}438\cdot 10^{-6}T^3. \qquad (8)$$

Таблица 1. **Значения давления насыщения пара лития при различных температурах**

| $T$, К | $P$, Па |
|---|---|
| 300 | $9{,}81\cdot 10^{-18}$ |
| $T_{пл}$ | $2{,}41\cdot 10^{-8}$ |
| 500 | $1{,}08\cdot 10^{-6}$ |
| 600 | $5{,}19\cdot 10^{-4}$ |
| 700 | $4{,}16\cdot 10^{-2}$ |
| 800 | 0,11 |
| 1000 | 10,36 |
| 1200 | 211,1 |

При температуре плавления теплоемкость жидкого лития составляет 4,39 Дж/(г·К).

Пары лития, как и других щелочных металлов, представляют собой смесь атомарного и молекулярного пара вследствие эффекта димеризации. Теплота диссоциации двухатомной молекулы лития составляет 6,4 кДж/моль.

Плотность $\rho_V$, теплота испарения $H_E$, теплоемкость насыщенного пара лития $C_P$ и равновесная доля $X_2$ двухатомных молекул в нем при различных температурах приведены в табл. 2.

По сравнению с другими легкоплавкими металлами литий обладает максимально высокой теплотой испарения. Термодинамические параметры пара лития, не находящегося на линии насыщения, табулированы в работе [4].

Таблица 2. **Термодинамические свойства насыщенного пара лития**

| $T$, K | $X_2$ | $\rho_V$, кг/м$^3$ | $H_E$, $10^{-3}$ кДж/кг | $C_P$, кДж/(кг·К) |
|---|---|---|---|---|
| 900 | 0,004 | $0{,}128\cdot10^{-4}$ | 21,76 | 3,94 |
| 1000 | 0,008 | $0{,}872\cdot10^{-4}$ | 21,59 | 4,43 |
| 1100 | 0,014 | $0{,}413\cdot10^{-3}$ | 21,39 | 4,95 |
| 1200 | 0,021 | $0{,}150\cdot10^{-2}$ | 21,17 | 5,45 |
| 1300 | 0,030 | $0{,}444\cdot10^{-2}$ | 20,93 | 5,91 |

Способность жидкого металла смачивать контактирующие с ними материалы, проникать в поры и трещины зависит от смачиваемости материалов литием и его поверхностного натяжения. Для лития в интервале температур 200—1300 ºС величина поверхностного натяжения определялась экспериментально. Обобщенное уравнение для поверхностного натяжения σ лития (в мН/м) имеет следующий вид:

$$\sigma = 438{,}98 - 18{,}44\cdot10^{-3}T - 132{,}20\cdot10^{-6}T^2 + 37{,}44\cdot10^{-9}T^3. \quad (9)$$

Сравнивая величину поверхностного натяжения, мН/м, при температуре плавления для лития 406, натрия 200, калия 112, рубидия 87 и цезия 71, можно видеть, что литий имеет максимальное значение этой характеристики. Это в сочетании с низкой плотностью и определяет уникальные капиллярные свойства лития.

Высокое значение поверхностного натяжения лития обусловливает высокое капиллярное давление, которое может создаваться в литиевых капиллярных структурах $P_C$, Па, и определяется соотношением

$$P_C = 2\,\sigma(T)\cos\theta/R_{эф}, \quad (10)$$

где θ — краевой угол смачивания, $R_{эф}$ — эффективный радиус пор в капиллярной системе. Зависимость капиллярного давления в литиевых капиллярных структурах при cosθ, равном единице, представлена на рис. 2.

**Переносные свойства конденсированной и паровой фазы.** Удельное электросопротивление ρ, мкОм·см, твердого лития описывается выражением

$$\rho = 8{,}55 + 38{,}1\cdot10^{-3}\,t. \quad (11)$$

Для лития в жидком состоянии предложена обобщенная температурная зависимость электропроводности $k$, Ом$^{-1}$·м$^{-1}$:

$$k = 0{,}9249\cdot10^9T^{-1} + 2{,}3167\cdot10^6 - 0{,}7131\cdot10^3T. \quad (12)$$

Проведенные исследования влияния чистоты лития на его электросопротивление при 300 ºС показали, что примеси азота, кислорода, углерода и водорода повышают его электросопротивление (рис. 3).

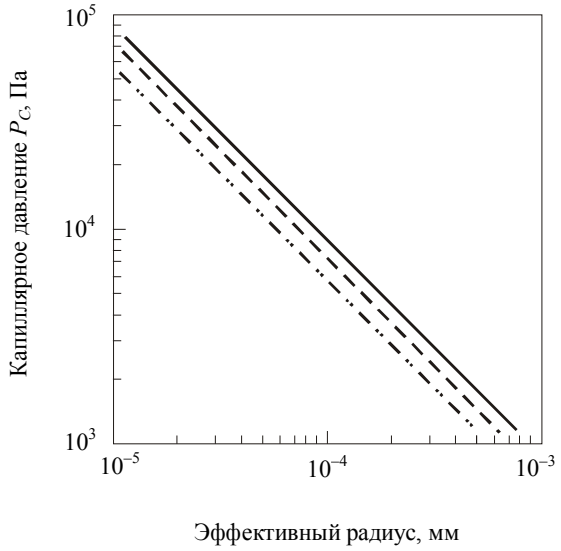



Рис. 2. Капиллярное давление лития $P_C$ как функция эффективного радиуса пор капиллярно-пористой системы $R_{эф}$ при различных температурах: ——— — 200 ºС; – – – — 600 ºС; — ·· — ·· — — 1000 ºС

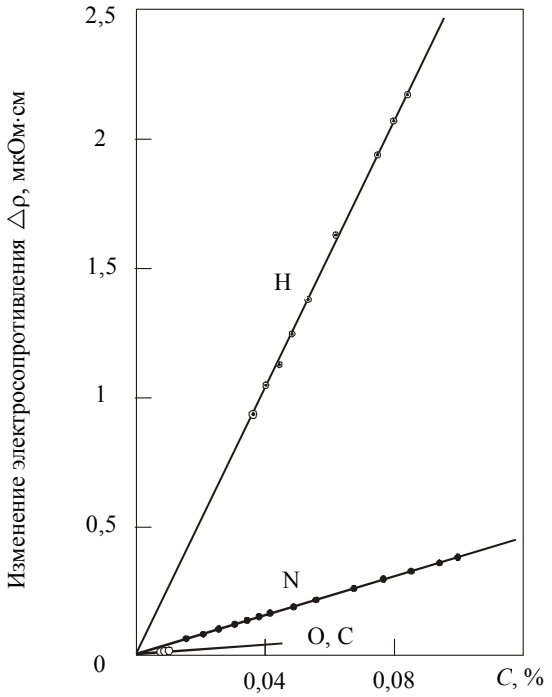



Рис. 3. Влияние концентрации примесей на электросопротивление лития при 300 ºС

Наибольшее влияние оказывает примесь азота, введение 0,1% (в атомных долях) которого увеличивает сопротивление лития на 0,7 мкОм·см. По другим данным [10], полученным при температурах 280—350 ºС, в интервале концентраций $C$ до 0,1% примеси азота и водорода в литии его электросопротивление растет пропорционально концентрации примеси $\Delta\rho_N = 3{,}6C_N$ и $\Delta\rho_H = 25C_H$.

Теплопроводность жидкого лития λ, Вт/(м·К), определяется выражением

$$\lambda = 24{,}8 + 45{,}0\cdot10^{-3}T - 11{,}6\cdot10^{-6}T^2. \quad (13)$$

При переходе из твердого состояния в жидкое в точке плавления теплопроводность лития падает с 71,2 до 42,8 Вт/(м·К).

Динамическая вязкость лития определялась экспериментально. Обобщение имеющихся данных показало, что при температуре выше точки плавления вязкость η, Па·с, описывается выражением

$$\ln\eta = -4{,}16435 - 0{,}63740\ \ln T + 292{,}1/T. \quad (14)$$

Теплопроводность $\lambda_V$ и динамическая вязкость $\eta_V$ паров лития на линии насыщения при различных температурах приведены в табл. 3.

Таблица 3. **Теплопроводность и динамическая вязкость паров лития на линии насыщения**

| Свойство | Температура, К | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
| $\lambda_V$, Вт/(м·К) | 0,0546 | 0,0636 | 0,0725 | 0,0813 | 0,0900 |
| $\eta_V\cdot10^6$, Па·с | 9,8 | 10,6 | 11,2 | 11,7 | 12,0 |

Низкая вязкость жидкого лития, высокая теплопроводность в сочетании с низкой плотностью, большим интервалом жидкого состояния и другими свойствами ставят литий как рабочее тело капиллярной системы и теплоноситель вне конкуренции по сравнению с другими жидкими металлами.

**Электронная эмиссия.** Данные о процессах электронной эмиссии весьма ограничены. Важнейшей эмиссионной характеристикой металла является работа выхода, равная минимальной энергии, необходимой для перемещения электрона с поверхности Ферми в теле в вакуум, в точку пространства, где напряженность электрического поля практически равна нулю. Для лития работа выхода равна 2,38 эВ.

Эмиссия электронов может происходить под воздействием электромагнитного излучения. Средняя энергия основной фотоэлектронной рентгеновской линии лития (1s-переход) составляет 56 эВ. Относительное сечение фотоионизации лития равно 0,009 (за 1 принято сечение фотоионизации 1s-линии натрия). Коэффициент вторичной электронной эмиссии при облучении поверхности лития электронами энергией 75 эВ равен 0,48. В спектрах вторичных электронов имеются узкие линии, соответствующие вторичным электронам, которые вышли из металла без рассеяния — оже-электроны. Энергия основного пика оже-электронов для лития (KLL-переход) равна 43 эВ. Электроны эмитируются также при облучении металла ионами (ионно-электронная эмиссия). В табл. 4 приведены коэффициенты ионно-электронной эмиссии лития γ при облучении литиевой мишени ионами.

Таблица 4. **Коэффициенты ионно-электронной эмиссии лития γ, электрон/ион**

| Первичный ион | Энергия первичных ионов, кэВ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2 | 4 | 7 | 15 | 30 | 50 |
| $H^+$ | 0,48 | 0,65 | 0,83 | 1,12 | 1,36 | 1,55 |
| $H_2^+$ | 0,26 | 0,37 | 0,47 | 0,68 | 0,95 | 1,16 |
| $He^+$ | 0,47 | 0,59 | 0,74 | 1,10 | 1,54 | 1,95 |

**Процессы при испарении и конденсации.** Процесс перехода металла из жидкого состояния в парообразное называют испарением, обратный процесс — конденсацией. Эти процессы могут осуществляться в условиях, отличающихся большим разнообразием, которое может относиться к форме существования конденсированной фазы (жидкая пленка, капли), к наличию или отсутствию примесей на поверхности жидкой фазы и при наличии неконденсирующейся среды. И испарение и конденсация являются сложными процессами, при которых происходит как перенос тепла, так и массы. Перенос тепла характеризуют коэффициентом теплоотдачи α, перенос массы — коэффициентом массоотдачи β. Эти

параметры используют для описания интенсивности процесса фазового перехода в целом. Используется также величина, обратная коэффициенту теплоотдачи, — термическое сопротивление $R = 1/\alpha$. Термическое сопротивление при испарении и конденсации складывается в условиях отсутствия загрязнений фазовых границ и паровой фазы из термического сопротивления фазового перехода и термического сопротивления в конденсированной фазе. Процессы испарения с поверхности жидкого металла и конденсации пара на этой поверхности являются динамическими и должны рассматриваться с кинетических позиций. В условиях термодинамического равновесия фаз поток атомов, испаряющихся с поверхности $i_V$, равен потоку атомов, конденсирующихся на ней $i_к$. В общем случае не все атомы, соударяющиеся с поверхностью, удерживаются ею. Часть атомов $i_{mir}$ может отражаться обратно в пар. Доля атомов, конденсирующихся при соударении с поверхностью, отнесенная ко всем атомам, претерпевшим соударение, получила название коэффициента конденсации $f$ (в условиях испарения используется понятие коэффициент испарения). В общем случае эти коэффициенты могут отличаться, но во всех случаях, интересующих нас с позиции использования лития в плазменной камере токамака, эти коэффициенты равны. Видимый процесс испарения или конденсации является следствием отклонения от условий равновесия, когда нарушается равенство потоков испарения и конденсации (рис. 4).

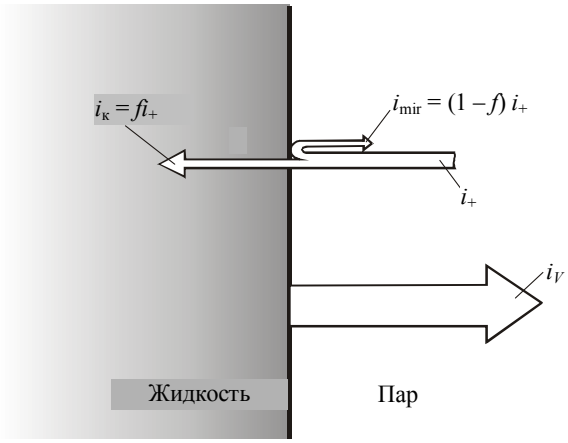



Рис. 4. Схема процесса испарения

При этом температура на поверхности жидкости отличается от температуры насыщения пара над этой поверхностью. Имеется скачок температуры на границе фазового перехода (термическое сопротивление фазового перехода). В этом случае имеется и скачок давления, определяемый балансом действующих сил. Используя газокинетические представления, предложены зависимости для количественного описания процесса испарения. В случае, когда процесс идет с небольшим отклонением от равновесия, скорость испарения $G$ определяется выражением:

$$G = \frac{f}{1 - 0,4f} \frac{P_0 - P}{g\sqrt{2\pi R T_0 M^{-1}}}. \qquad (15)$$

Выражение (15) применимо при $(P_0 - P)/P \leq 0,1$.

Для процесса испарения, при котором отклонения от равновесия велики, приводится приближенная формула для оценки величины $G$:

$$G = \frac{8P}{g\sqrt{2\pi R T M^{-1}}} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{f^2} - \frac{1}{f} + \frac{P_0}{4P}\sqrt{\frac{T}{T_0}}} \right), \qquad (16)$$

где $T$ и $T_0$ — температура пара и поверхности жидкого металла соответственно, К; $P$ и $P_0$ — давление насыщенного пара, соответствующее этим температурам; $R$ — универсальная газовая постоянная; $M$ — относительная молекулярная масса пара; $g$ — ускорение свободного падения и $f$ — коэффициент испарения.

В случае высокой интенсивности фазового перехода, такой, как при испарении в вакуум, скорость испарения практически целиком определяется температурой поверхности жидкого металла и не зависит от температуры (давления) пара. Максимальная скорость испарения с открытой поверхности жидкого металла в вакуум определяется выражением:

$$G_{max} = f \frac{P_0}{g\sqrt{2\pi R T_0 M^{-1}}}. \qquad (17)$$

Коэффициент $f$ сильно зависит от наличия загрязнений (пленок химических соединений и др.) на поверхности жидкости. Поверхностные загрязнения могут снижать скорость испарения на порядки величин.

На рис. 5 приведено сравнение экспериментальных данных по измерению скорости испарения лития с открытой поверхности в вакуум с расчетными значениями. Наблюдаемое снижение экспериментально определенной скорости испарения при температуре выше ~470 ºС связано с изменением характера испарения от молекулярного к вязкостному при относительно высоких температурах и повышением давления паров лития над поверхностью, а не с изменением качества поверхности испарения.

Испаряющийся металл эффективно отводит энергию с поверхности. Удельный максимальный тепловой поток $Q$, уносимый при испарении, определяется выражением

$$Q = rG_{\text{макс}}, \qquad (18)$$

где $r$ — теплота парообразования.

Температурная зависимость этой величины для различных материалов приведена на рис. 6.

Характер и закономерности конденсации паров жидкого металла зависят от условий смачивания материала, на котором конденсируется пар. Смачивание определяется краевым углом смачивания $\upsilon$ (рис. 7): при $\upsilon > 90^\circ$ твердая поверхность не смачивается жидким металлом, при $\upsilon < 90^\circ$ — смачивается. Значение краевого угла $\upsilon$ определяется силами взаимодействия молекул у границ жидкости, стенки и паровой фазы, характеризуемыми соответствующими коэффициентами поверхностного натяжения в состоянии динамического равновесия при отсутствии внешних сил. Поскольку обычно определены только коэффициенты поверхностного натяжения жидкости $\sigma$, краевой угол определяется экспериментально. Различают физическое и химическое смачивание. Первое определяется силами молекулярного взаимодействия, второе — действием ионных и гомеополярных сил.

В случае физического смачивания межфазные силы во много раз меньше, чем в случае химического. Для случая конденсации жидких металлов на чистых металлических поверхностях характерно химическое смачивание с образованием малых краевых углов. Наличие оксидных и других пленок на поверхности конденсации в общем случае может приводить к изменению характера смачивания, например, практическое отсутствие смачивания окисленного металла парами ртути. Однако поскольку литий обладает высоким химическим сродством к кислороду и другим неметаллам, смачивание его парами может быть даже эффективнее, чем чистого металла. Смачивание является про-

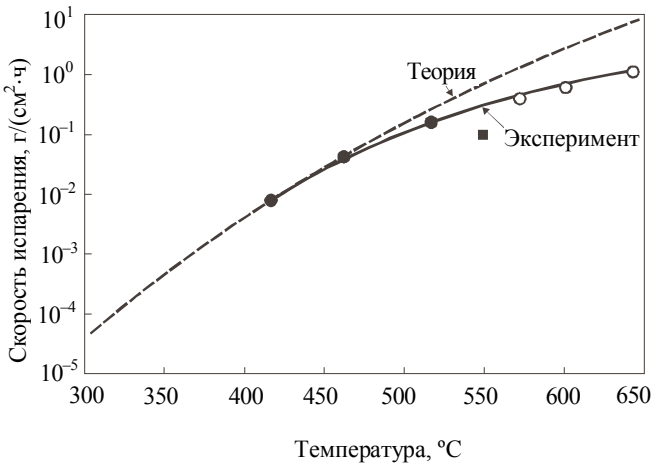



Рис. 5. Скорость испарения лития как функция температуры: ● — эксперимент; ■ — [10]; ○ — [6]

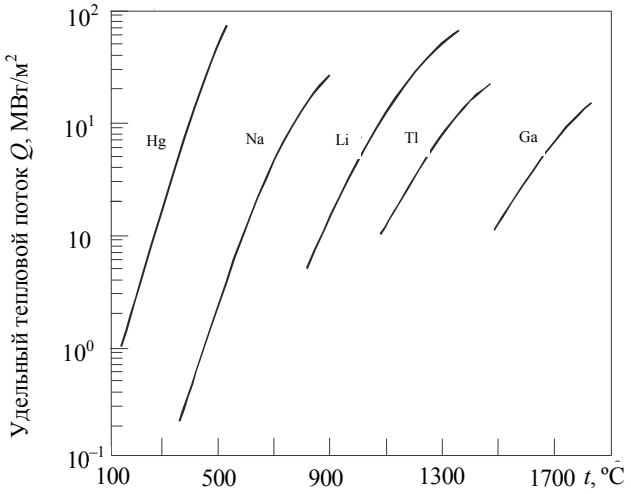



Рис. 6. Предельная величина удельного теплового потока, уносимого при испарении со свободной поверхности жидкого металла

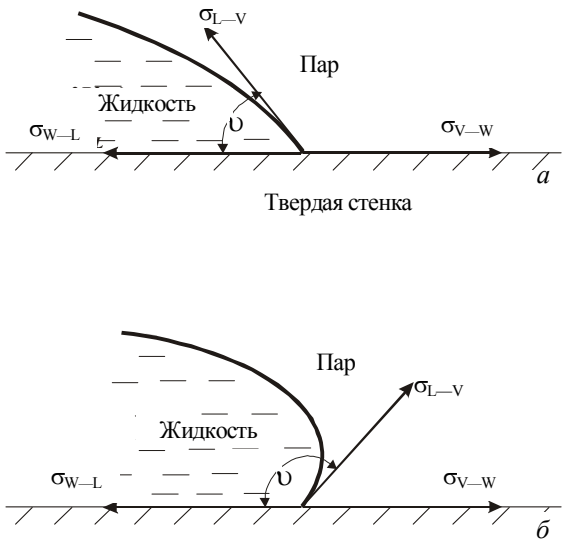



Рис. 7. Смачивание (*а*) и несмачивание (*б*) твердой стенки жидким металлом

цессом, лимитируемым кинетикой межфазного взаимодействия, который протекает тем медленнее, чем ниже температура. Характер и кинетика смачивания металлических подложек жидким литием иллюстрируются данными, приведенными на рис. 8. Литий, как и другие щелочные металлы, смачивает конструкционные материалы, и его конденсация носит пленочный характер (рис. 9).

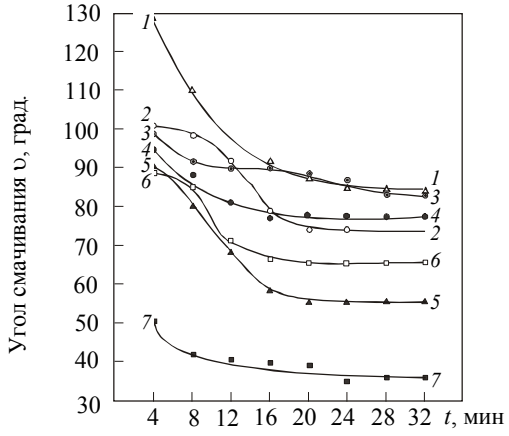



Рис. 8. Граничный угол смачивания металлов и сплавов литием при 300 ºС в зависимости от времени: *1* — хромистая ферритная нержавеющая сталь («свежая» поверхность); *2* — окисленная поверхность хромистой ферритной нержавеющей стали; *3* — аустенитная нержавеющая сталь Cr—Ni («свежая» поверхность); *4* — окисленная поверхность аустенитной нержавеющей стали Cr—Ni; 5 — чистый Ni; *6* — чистое железо («свежая» поверхность); *7* — поверхность окисленного чистого железа

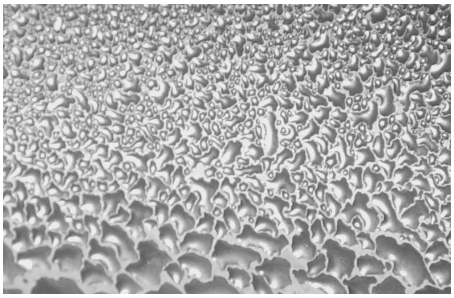


Рис. 9. Конденсированный литий на стали типа Х18Н10Т. Температура испарения ~460 ºС, температура конденсатора ~250 ºС

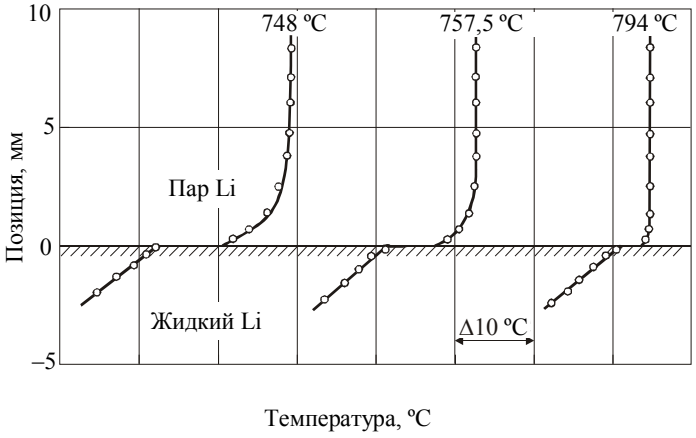



Рис. 10. Температурные поля при конденсации пара лития

На практике после некоторой «приработки» литиевых систем наблюдается полное смачивание твердого металла жидким (υ → 0). В процессе конденсации проявляются следующие граничные сопротивления: диффузионное сопротивление в слое пара у поверхности конденсации и сопротивление фазового перехода на границе пар—конденсат. Диффузионное сопротивление определяется в основном наличием в паре неконденсирующихся газов (например, гелия) и паров других веществ. Наличие в литиевом паре димеризованных молекул практически не сказывается на интенсивности конденсации. Как отмечалось, чистота поверхности может сильно влиять на коэффициент конденсации и, соответственно, на интенсивность конденсации. Это характерно для относительно низких температур, когда образующиеся за счет взаимодействия жидкого лития с остаточными газами в вакууме пленки оксидов и нитридов плохо растворяются в объеме металла.

Экспериментальные исследования процесса конденсации лития и других щелочных металлов трудны в реализации, и поэтому их результаты весьма противоречивы. В [14] были проведены исследования этого процесса при температурах 730—850 ºС по специально разработанной методике. В условиях практического отсутствия неконденсирующихся газов подвижным зондом определялись поля температур в паре, на межфазной границе и в жидкой фазе. Литий предварительно подвергался двукратной фракционной дистилляции. После нескольких суток вакуумирования экспериментальной установки в режиме кипения и конденсации лития поля температур стабилизировались и градиенты температур стали минимальными. Результаты приведены на рис. 10.

Эксперименты показали, что диффузионное сопротивление в паре отсутствует и термическое сопротивление при пленочной конденсации чистых паров лития складывается из сопротивления фазового перехода и сопротивления пленки конденсата.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛИТИЯ С МАТЕРИАЛАМИ, ГАЗАМИ, ЖИДКОСТЯМИ И ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Важнейшими требованиями к создаваемым эффективным источникам энергии ближайшего будущего и, в первую очередь, к термоядерному реактору являются:

— максимальная внутренне присущая ему безопасность в процессе эксплуатации;

— минимальное воздействие факторов, сопутствующих работе реактора, на персонал, население и окружающую среду;

— возможность утилизации и переработки отходов, отработанных материалов и конструкций реактора после вывода его из эксплуатации в обозримые сроки с помощью экономически оправданных технологий.

Отличием лития при использовании его как материала, контактирующего с плазмой, по сравнению с твердыми материалами является отсутствие в принципе ультрадисперсных продуктов эрозии (наночастиц и их агломератов) [15], аккумулирующих тритий и обладающих высокой реакционной способностью (пирофорность) при взаимодействии с воздухом и водой. Одним из факторов, определяющих безопасность литиевого реактора, является взаимодействие лития с водой, воздухом и другими средами. Жидкий литий взрывоопасен при соприкосновении с водой, активно взаимодействует с воздухом, углекислым газом и азотом при повышенных температурах, может взаимодействовать с бетоном, керамикой [5, 16].

Достоверная информация о совместимости и взаимодействии лития с конструкционными, служебными материалами и технологическими средами определяет, с одной стороны, их правильный выбор, обеспечивающий безопасную длительную работоспособность реактора, и, с другой стороны, должна обеспечить правильный выбор условий работы, обеспечивающих сохранение необходимых свойств открытой литиевой поверхности при ее формировании в плазменной камере реактора и в процессе его работы.

Значительная потенциальная опасность имеется и при использовании других материалов. Сравнение максимальной потенциально запасенной химической энергии взаимодействия с водой и воздухом и объемов выделяющегося при взаимодействии водорода для лития, эвтектической композиции Li17Pb83 и бериллия (рис. 11) показывает, что из рассматриваемых материалов наиболее потенциально опасным является бериллий [17].

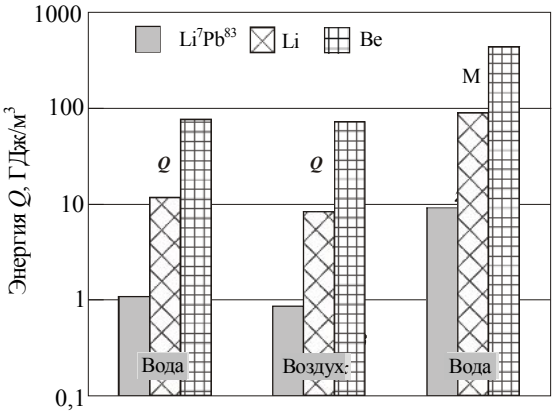



Рис. 11. Максимальное количество энергии $Q$ и объем водорода $M$, выделяющиеся при взаимодействии различных материалов с водой и воздухом

**Растворимость неметаллических примесей в литии и образование соединений.** Характер взаимодействия лития с кислородом, азотом, углеродом во многом определяется растворимостью этих примесей в литии и образованием соединений.

Зависимость растворимости неметаллических примесей в литии от температуры в практически интересующем интервале температур описывается выражением

$$\ln C = A - BT^{-1}, \qquad (19)$$

где $C$ — концентрация примеси в жидком металле в атомных долях, %; $T$ — температура, К; $A$ и $B$ — константы. Исходя из анализа совокупности имеющихся результатов, рекомендованы параметры этой зависимости, приведенные в табл. 5.

О концентрации насыщения примесей в литии при температуре его затвердевания, температуре работы холодной ловушки и при 600 ºС можно судить по данным, представленным в табл. 6. Наибольшей растворимостью в литии обладает азот.

Таблица 5. **Параметры выражения (19) [20]**

| Примесь | Температура, ºС | Параметр | |
|---|---|---|---|
| | | $A$ | $B$ |
| Водород | 250—502 | 8,112 | 5314 |
| Дейтерий | 199—498 | 7,706 | 5082 |
| Углерод | 204—635 | 3,505 | 5750 |
| Азот | 195—450 | 7,581 | 4832 |
| Кислород | 257—442 | 6,033 | 6659 |

Таблица 6. **Растворимость неметаллов в литии, %**

| Примесь | Температура, ºС | | |
|---|---|---|---|
| | 180,5 | 200 | 600 |
| Водород | 0,0039 | 0,0064 | 1,180 |
| Дейтерий | 0,0087 | 0,00139 | 1,990 |
| Углерод | 0,0002 | 0,0003 | 0,080 |
| Азот | 0,0938 | 0,1455 | 14,50 |
| Кислород | 0,0004 | 0,0007 | 0,467 |

Характерной особенностью лития как щелочного металла является его активное взаимодействие с азотом и образование оксида лития $Li_2O$, обладающего высокой термодинамической прочностью по сравнению с оксидами большинства металлов. Литий при непосредственном взаимодействии с кислородом не образует перекисных соединений. Менее термодинамически прочными являются карбид лития $Li_2C_2$ и нитрид лития $Li_3N$. Сообщается также и о существовании азида лития $LiN_3$. Некоторые свойства основных соединений лития приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. **Основные свойства соединений лития**

| Соединение | Плотность, г/см$^3$ | Температура плавления, °С |
|---|---|---|
| $Li_2O$ | 2,01 | 1700 |
| LiOH | 1,43 | 450 |
| $Li_3N$ | 1,29 | 813 |
| $Li_2C_2$ | 1,65 | — |
| LiH | 0,78 | 690 |
| $Li_2CO_3$ | 2,11 | 715 |

На рис. 12 приведены диаграммы состояний литий—неметаллическая примесь, определяющие характер взаимодействия в этих системах. Это диаграммы эвтектического типа.

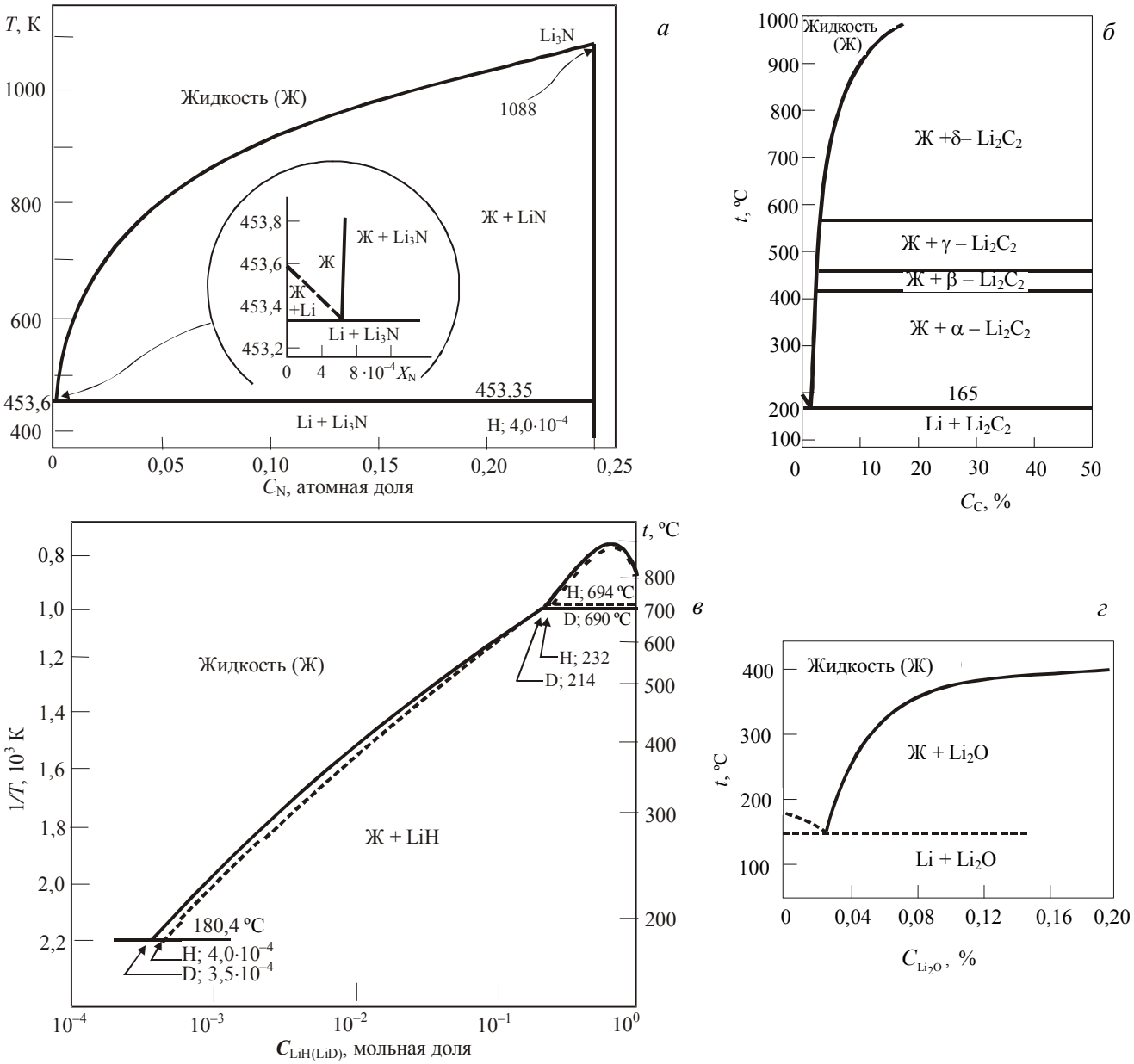



Рис. 12. Фазовые диаграммы Li—$Li_3N$ [18] (*а*), Li—$Li_2C_2$ [5] (*б*), Li—LiH [19] (*в*), Li—$Li_2O$ [6] (*г*)

**Совместимость лития с металлами и сплавами.** Работоспособность и безопасность литиевых систем термоядерного реактора в первую очередь определяется правильным выбором для них конструк-

ционных и служебных материалов. Взаимодействие конструкционных материалов с жидким литием зависит от многих параметров. К их числу следует отнести температуру, перепад температур в жидкометаллической системе, продолжительность работы, наличие неметаллических примесей в жидком металле, химический и фазовый состав твердого металла, механические напряжения. Процесс взаимодействия выражается в растворении твердого металла в жидком, переносе масс конструкционного материала, проникновении жидкого металла в твердый. Развитие этих процессов может привести к ухудшению свойств материалов, нарушению работоспособности литиевых систем в целом [21—24].

Фундаментальным процессом коррозионного взаимодействия конструкционных материалов с жидкими металлами, лежащим в основе практически всех других процессов и определяющим характер и степень их развития, является растворение твердого металла в жидком. Кинетика растворения твердого металла в литии определяется выражением

$$C_V = C_{\text{нас}}[1 - \exp(-D\,\delta_D^{-1} S\, V_{\text{ж}}^{-1}\tau)], \tag{20}$$

где $C_V$ — концентрация растворяющегося металла в жидком; $C_{\text{нас}}$ — равновесная растворимость; $\tau$ — время; $D\,\delta_D^{-1} = \alpha$ — константа скорости растворения; $S$ — площадь поверхности растворяемого металла, контактирующего с жидким раствором; $V_{\text{ж}}$ — объем жидкого металла; $D$ — коэффициент диффузии растворяющегося металла в жидком; $\delta_D$ — толщина пограничного диффузионного слоя.

Главной характеристикой процесса растворения является $C_{\text{нас}}$ (далее растворимость). Она является наиболее важным показателем совместимости жидкометаллических сред с конструкционными материалами.

Основой и наиболее важными легирующими компонентами всех конструкционных материалов, предназначенных для литиевых систем, являются переходные металлы. Поскольку промежуточных фаз в системе литий—переходный металл, как правило, нет, при всех температурах, не превышающих температуру кипения жидкого лития, в равновесии с насыщенным жидким раствором на его основе будет находиться чистый твердый металл. При достаточно малых концентрациях жидкометаллического раствора, что имеет место в практически интересующей ситуации, температурная зависимость растворимости металла или компонента сплава эта зависимость имеет вид

$$\ln x = a - b/T. \tag{21}$$

Надежность имеющихся в литературе экспериментальных данных по растворимости зависит, главным образом, от применяемых экспериментальных методов определения этого параметра и чистоты исходных материалов.

Наиболее точное и достоверное определение растворимости металлов в литии проведено методом, основанным на анализе спектров поглощения рентгеновского излучения, для которого этот легкоплавкий металл достаточно «прозрачен». Методом абсорбционного рентгеноспектрального анализа определена растворимость железа, хрома, никеля, марганца, кобальта, ванадия, ниобия и молибдена в литии с содержанием металлических примесей (в основном натрия) менее 0,1%, кислорода не более $5\cdot10^{-3}$% и азота менее $1\cdot10^{-3}$% [22]. Эти данные в совокупности с результатом термодинамического анализа систем переходный металл—жидкий литий [22] позволили получить полную картину растворимости практически важных металлов в литии (рис. 13).

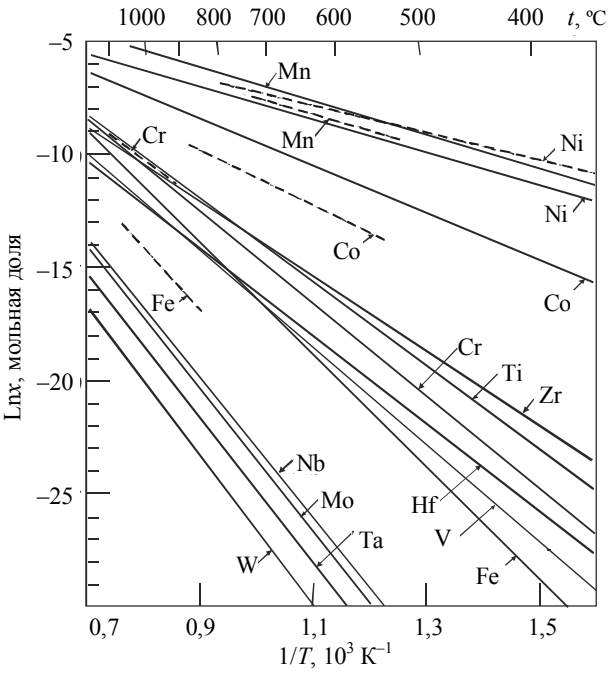



Рис. 13. Растворимость металлов в литии высокой чистоты: ——— — расчет; - - - - - — эксперимент

Этим же методом определена растворимость компонентов сталей и сплавов. На рис. 14 представлены температурные зависимости растворимости никеля — наиболее растворимого в литии компонента нержавеющих сталей. Сильное влияние на величину растворимости металлов в литии оказывают неметаллические примеси и, в первую очередь, примесь азота. На рис. 15 продемонстрировано влияние примеси азота в литии на растворимость в нем компонентов стали типа 304. Обнаружено сильное влияние примеси азота и на растворимость тугоплавких материалов. Например, при 1000 ºС растворимость молибдена в чистом литии составляет ~$10^{-3}$%, а в литии с 1% примеси азота ~1,4% [9].

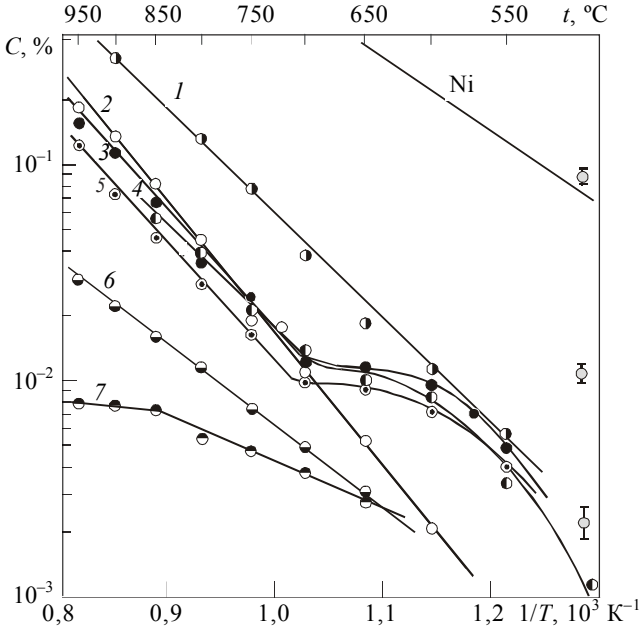



Рис. 14. Растворимость никеля из сталей и сплавов в литии: *1* — Cr—28Ni—WNbMo; *2* — Fe—16Cr—15Ni—3Mo—Nb; *3* — Fe—20Cr—14Ni—2Si; *4* — SS316; *5* — Fe—18Cr—10Ni—Ti; *6* — Fe—12Cr—2Ni—3Mo—Nb; *7* — F—12C—WMoNbB

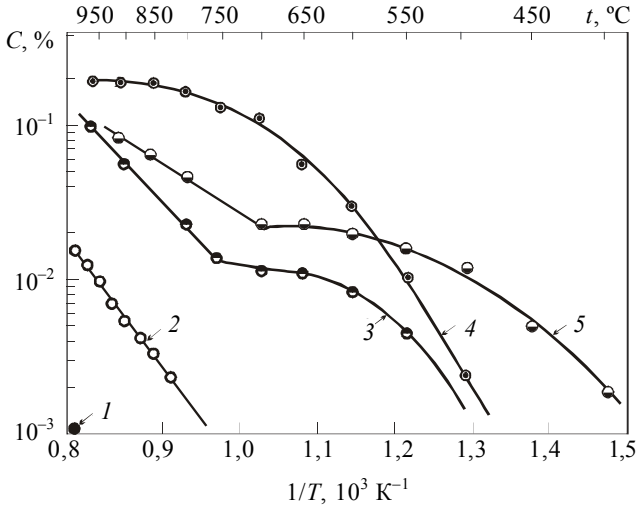



Рис. 15. Растворимость компонентов стали типа Х18Н10Т в литии: *1* — Fe; *2*, *4* — Cr; *3*, *5* — Ni; *1*, *2*, *3* — литий высокой чистоты; *4*, *5* — литий с 0,5% примеси азота

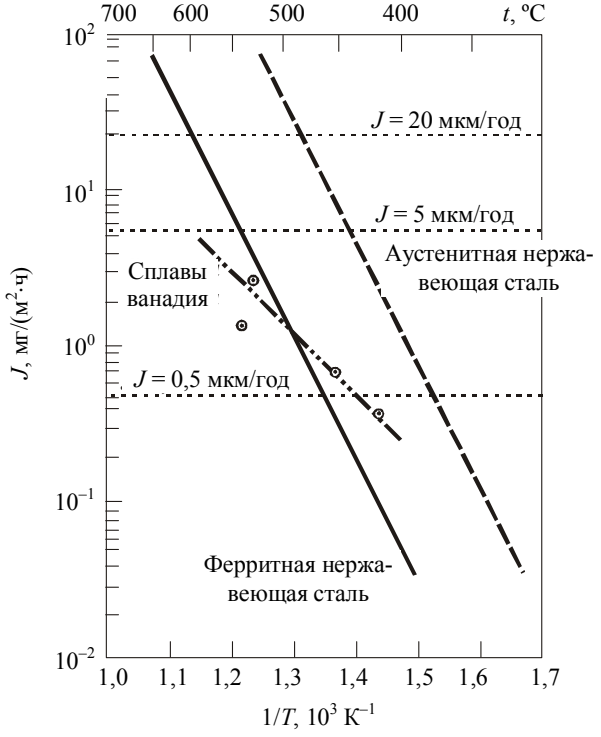



Рис. 16. Температурная зависимость скорости растворения ванадиевых сплавов и нержавеющих сталей в потоке лития

Обобщение и анализ экспериментального материала по переносу массы конструкционных материалов в динамических литиевых неизотермических системах (рис. 16) позволяет в первом приближении оценивать их устойчивость к воздействию потока лития следующим образом. При значениях растворимости ≤ 0,01% материал пригоден для длительной (десятки тысяч часов) эксплуатации в контакте с литием, при растворимости от 0,01 до 0,1% материал ограничено годен для использования (до ~1000 часов) и при растворимости >0,1% материал может работать короткое время (до ~100 часов). С этой точки зрения стойкими материалами в чистом литии являются тугоплавкие металлы (Mo, W, Nb, V) и сплавы на их основе, хромистые нержавеющие стали. Хромоникелевые аустенитные стали устойчивы в литии до ~550 ºС. Повышение содержания примеси азота ведет к существенному снижению их коррозионной стойкости. Для сплавов на основе ванадия характерно

взаимодействие с литием, содержащим азот, приводящее к образованию пленки нитрида [21]. Формирование такой пленки повышает устойчивость сплавов ванадия к воздействию потока лития (рис. 17). Устойчив к воздействию чистого лития бериллий. Он взаимодействует с примесями в литии с образованием оксинитридов. Однако это взаимодействие протекает заметным образом только при температурах >700 ºС [24]. Такие материалы, как сплавы на основе алюминия, магния, меди и благородных металлов, абсолютно нестойки в жидком литии при температуре >200 ºС.

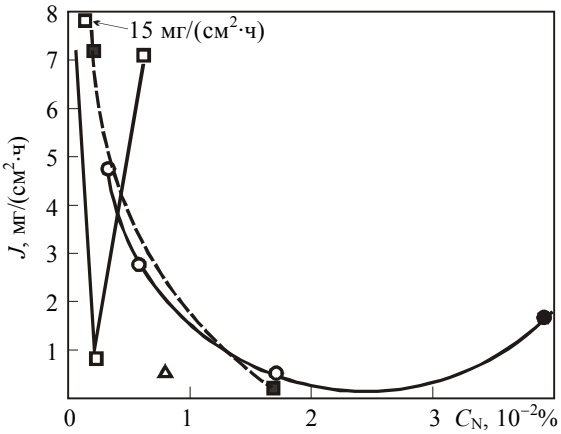



Рис. 17. Влияние концентрации азота в потоке лития на скорость растворения в нем сплавов на основе ванадия: □ — V—3Ti—1Si, 550 ºС; ■ — V—3Ti—1Si, 482 ºС; ○ — V—5Ti—15Cr, 482 ºС; △ — V—9Ti—5Cr, 450 ºС; ● — V—5Ti—8Cr—0,04Zr, 450 ºС

Повышенное содержание неметаллических примесей как в жидком литии, так и в конструкционных материалах может приводить к такому виду коррозионного воздействия, как проникновение лития через оболочки. Этот вид воздействия связан с химическим взаимодействием лития с фазами в твердом металле, обогащенном примесями (оксиды, нитриды, карбиды, сульфиды и др.), располагающимися, как правило, по границам зерен металла или сплава. В результате может происходить изменение объема твердого металла и деградация его механических свойств. Такой вид коррозионного взаимодействия (так называемая реакционная диффузия лития) протекает с высокой скоростью. Этот эффект особенно характерен для углеродистых сталей, сталей, легированных азотом. Ванадий, ниобий, тантал с примесью кислорода также подвержены проникновению в них лития, которое приводит к утечке жидкого металла через оболочку без потери ею вакуумной герметичности. Для температуры 600 ºС пороговые уровни кислорода для инициирования проникновения лития в тантал, ниобий и ванадий составляют соответственно 0,015, 0,04 и ≥0,2% [21]. С повышением температуры пороговая концентрация проникновения для всех металлов возрастает.

Для обеспечения максимальной коррозионной стойкости сталей и сплавов в литии необходимо поддерживать уровень неметаллических примесей в системе на оптимальном уровне.

**Совместимость лития с неметаллическими материалами.** Керамические материалы могут рассматриваться как конструкционные материалы, предназначенные для эксплуатации в контакте с жидкими металлами или их парами, и как электроизоляционные материалы или как твердые электролиты для электрохимических датчиков концентрации кислорода и азота в литии [21].

Простейшая оценка совместимости соединения с литием заключается в сравнении свободных энергий образования $Li_2O$ или $Li_3N$ и соответствующего оксида или нитрида. Более точные оценки стойкости химических соединений можно получить, сравнивая энергии их образования и энергии образования раствора неметалла в жидком литии. Зависимость свободной энергии образования разбавленного раствора неметалла А с концентрацией $x$, в рассматриваемом случае кислорода или азота, в литии $\Delta G$ определяется как

$$\Delta G = \Delta G^0_{\mathrm{LiA}_m} + RT\ln(x/x^0), \qquad (22)$$

где $\Delta G^0_{\mathrm{LiA}_m}$ — свободная энергия образования соединения лития с неметаллом $\mathrm{LiA}_m$; $x^0$ — концентрация насыщения неметалла в литии.

Из этого следует, что чем ниже содержание кислорода или азота в литии, тем менее устойчивыми в контакте с ними становятся керамические материалы. На рис. 18 [25] приведены температурные зависимости энергии образования наиболее термодинамически стабильных двойных оксидов и нитридов, оксида и нитрида лития, а также рассчитанные температурные зависимости образования растворов кислорода и азота в литии. Из этих данных следует, что в среде лития термодинамически устойчивыми могут быть $Er_2O_3$, BeO, $Y_2O_3$, $Si_3N_4$, BN, AlN, $ThO_2$ и MgO, причем это справедливо при относительно высокой концентрации неметаллических примесей в литии. Поскольку оксид лития в отличие от нитрида является одним из самых термодинамически стабильных соединений среди оксидов других элементов, керамические материалы на основе нитридов представляются более предпочтительными для использования их в среде лития.

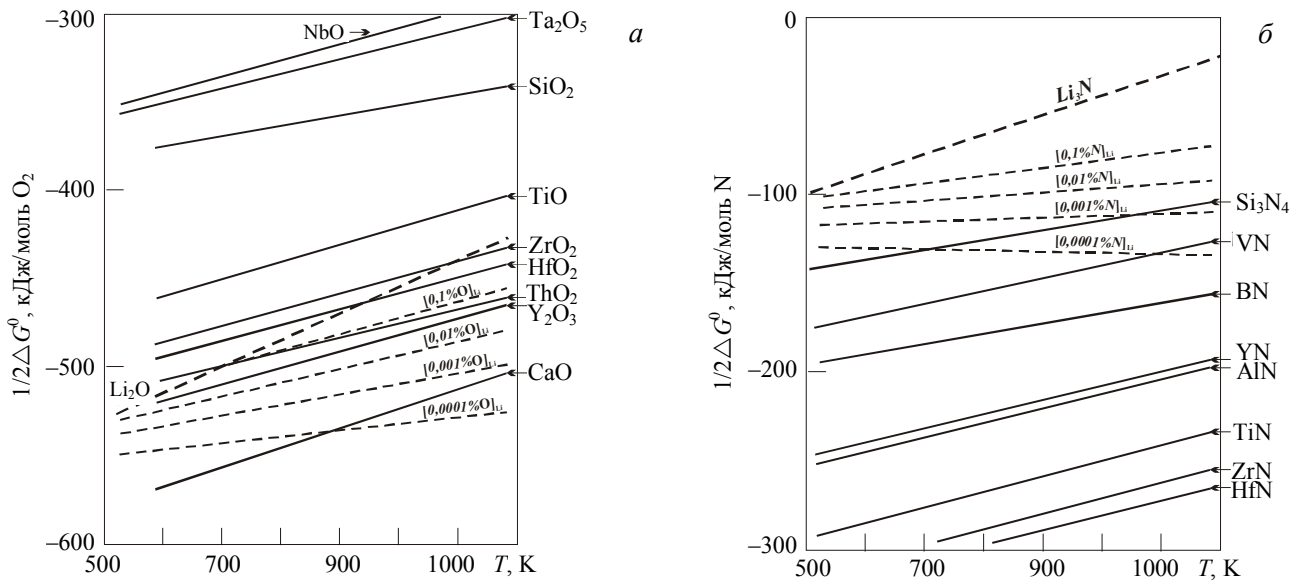



Рис. 18. Свободная энергия образования оксидов (*а*), нитридов (*б*) и разбавленных растворов кислорода (*а*), азота (*б*) в литии

Однако оценка стойкости керамических материалов на основе использования данных о стабильности двойных соединений имеет ограниченное значение, поскольку взаимодействие в системе керамический материал—литий с примесью кислорода, азота, углерода носит более сложный характер. При анализе продуктов взаимодействия в таких системах наряду с двойными обнаружены тройные соединения: $Li_3BN_2$, $Li_2SiN_2$, $Li_2ZrO_3$, $LiYO_2$, $LiHfO_2$, $LiThN_2$, $LiZrN_2$, $Li_2HfN_2$, $Th_2N_2O$ [18, 21, 26, 27]. Характерным является влияние примеси азота на стойкость оксидных керамик в литии. При исследовании взаимодействия $TiO_2$, $ZrO_2$, $HfO_2$ и $ThO_2$ с литием при 600 °С установлено следующее. В литии с низким исходным содержанием примесей азота и кислорода диоксиды Ti, Zr и Hf перерождались в различной степени в тройные оксиды типа $LiMeO_2$, а $ThO_2$ с литием не реагировал. При содержании примеси азота до 0,6% в литии этот оксид превращался в нитрид ThN, а при увеличении содержания примеси азота продуктом реакции являлось соединение $Li_2ThN_2$. Аналогичным образом с литием взаимодействуют и $TiO_2$, $ZrO_2$, $HfO_2$. Из этого следует, что рост концентрации азота в литии способствует перерождению оксида в нитрид, а рост концентрации кислорода препятствует этому процессу.

Из-за сложности точного прогнозирования стойкости керамических материалов в литии основным критерием при их выборе для конкретных условий эксплуатации следует считать результаты экспериментальной проверки совместимости. Обобщая имеющиеся экспериментальные данные, можно заключить, что при температурах до ~500 ºС в литии с оптимальным содержанием примесей устойчивы такие соединения, как $Sc_2O_3$, $Y_2O_3$, $Er_2O_3$, BeO, AlN [27, 28]. При определенном химическом составе лития реализуется идея самовосстановления электроизоляционных покрытий внутренней поверхности литиевых трактов [27—29]. В этом случае деградация свойств покрытия из-за воздействия облучения и термоциклирования будет компенсироваться за счет процесса их «самозалечивания». Это важно для нейтрализации эффектов торможения потока жидкого лития, текущего в поперечном магнитном поле реактора-токамака.

Карбиды не обладают достаточными электроизолирующими свойствами. Поэтому практический интерес могут представлять, в основном, композитные материалы на основе карбида кремния SiC, которые могут использоваться в качестве конструкционного материала. Однако по данным авторов этот материал не совместим с жидким литием, интенсивно растворяясь в нем.

Следует отметить, что даже не вызывая перерождения основы материала, литий проникает в керамические материалы из-за их пористости или благодаря взаимодействию с примесями. Таким образом, эти факторы наряду с чистотой жидкого лития являются очень важными параметрами, которые необходимо учитывать в практической работе.

Особый случай — взаимодействие бетона, основой которого являются гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, с жидким литием. Такая ситуация может иметь место при аварийном истечении лития из систем реактора и его взаимодействии с самым распространенным строительным материалом — бетоном. Термодинамическая оценка прогнозирует активное взаимодействие этих материалов. Имеющиеся экспериментальные данные это подтверждают [16]. Так, при взаимодействии ~10 кг лития с различ-

ными типами бетонов при исходной температуре жидкого металла от 263 до 870 ºС на воздухе и в атмосфере аргона установлено следующее. Литий вступает в активную реакцию с бетоном как на воздухе, так и в инертной атмосфере. При исходной температуре лития выше 300 ºС взаимодействие идет бурно, его максимальная температура превышает 1000 ºС, литий проникает в материал на глубину 100 мм и более, выделяются продукты взаимодействия в виде аэрозолей и свободный водород. Соответствующими мерами такое взаимодействие не должно допускаться.

**Взаимодействие лития с воздухом, углекислым газом, кислородом и азотом**. Характеристики и закономерности взаимодействия лития с атмосферными газами имеют значение, во-первых, с точки зрения подготовки литиевых устройств, их правильной эксплуатации и, во-вторых, с точки зрения прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций.

Литий активно взаимодействует с атмосферными газами. Этот процесс зависит от состава газовой среды, влажности, температуры, наличия примесей в литии. Отличительной особенностью лития в ряду щелочных металлов является его взаимодействие с азотом. При контакте с литием азот реагирует даже при нулевой температуре. Взаимодействие лития с $O_2$, $N_2$, $CO_2$ идет с выделением избыточного тепла по следующим реакциям (при 500 ºС):

$$Li + 1/6N_2 \rightarrow 1/3Li_3N \text{ — 69 кДж/г-моль Li (414 кДж/г-моль } N_2\text{)}; \quad (23)$$

$$Li + 1/4O_2 \rightarrow 1/2Li_2O \text{ — 302 кДж/г-моль Li (1210 кДж/г-моль } O_2\text{)}; \quad (24)$$

$$Li + 3/4CO_2 \rightarrow 1/2Li_2CO_3 + 1/4C \text{ — 318 кДж/г-моль Li (424 кДж/г-моль } CO_2\text{)}. \quad (25)$$

При нормальных условиях литий медленно взаимодействует с воздухом. Конечным продуктом взаимодействия является $Li_2CO_3 \cdot OH$. Взаимодействие твердого лития сильно зависит от состояния его поверхности, наличия в литии примесей, влажности, температуры. Как следует из рис. 19, примеси в литии существенно ускоряют процесс взаимодействия. При нормальной температуре повышение влажности воздуха также ускоряет процесс взаимодействия (рис. 20) При влажности <80% продуктом взаимодействия лития с воздухом является $Li_3N$, а при высокой влажности смесь $Li_2CO_3$ с LiOH в соотношении 1:3.

При комнатной температуре в условиях нормальной влажности литий высокой чистоты (очистка дистилляцией с геттерированием) практически не взаимодействует с воздухом, длительное время сохраняя металлический блеск. В связи с этим можно предложить осуществлять работы с большой открытой поверхностью лития в твердом состоянии в атмосфере холодного воздуха с низкой влажностью (воздух Антарктиды). Повышение температуры ускоряет взаимодействие лития с воздухом (рис. 21). На воздухе литий технической чистоты может воспламениться при 200—300 ºС, а литий высокой чистоты воспламеняется при температуре >600 ºС [5, 6].

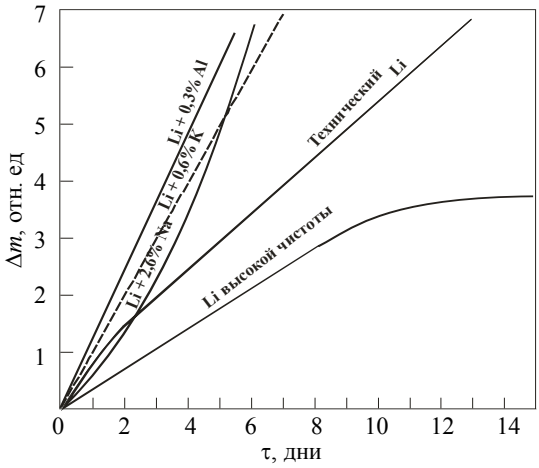



Рис. 19. Влияние чистоты лития на его взаимодействие с воздухом при нормальной влажности

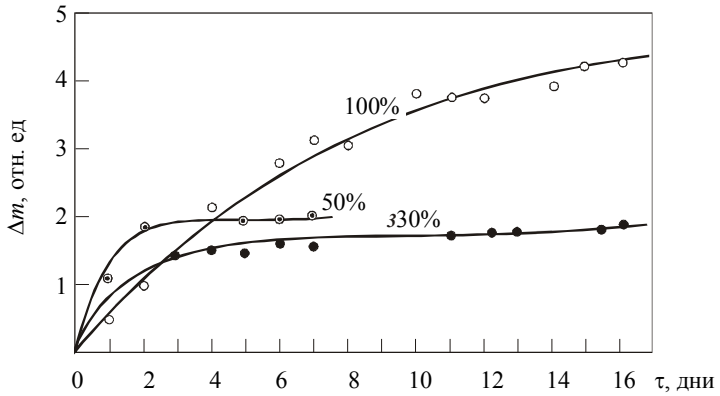



Рис. 20. Кинетика взаимодействия лития с воздухом различной влажности при комнатной температуре

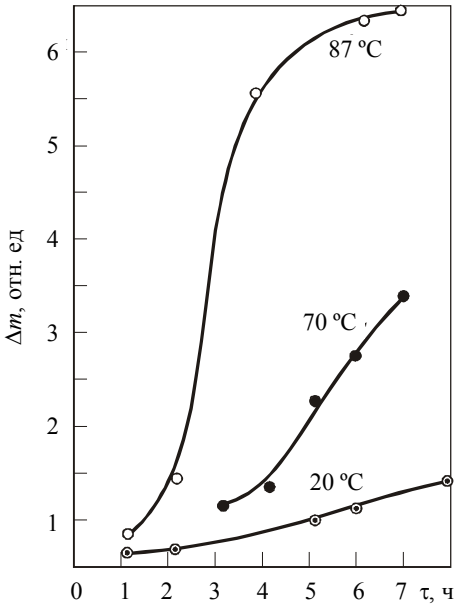



Рис. 21. Влияние температуры на взаимодействие лития с воздухом

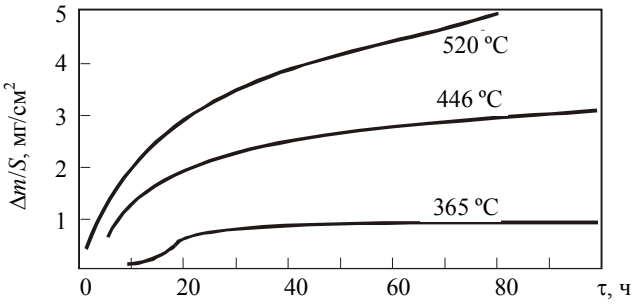



Рис. 22. Влияние температуры на кинетику взаимодействия лития с кислородом при давлении ~1,6·10$^4$ Па

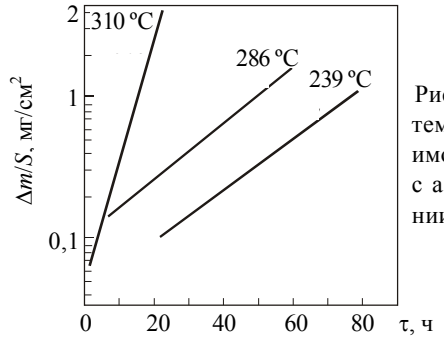



Рис. 23. Влияние температуры на взаимодействие лития с азотом при давлении ~1,4·10$^4$ Па

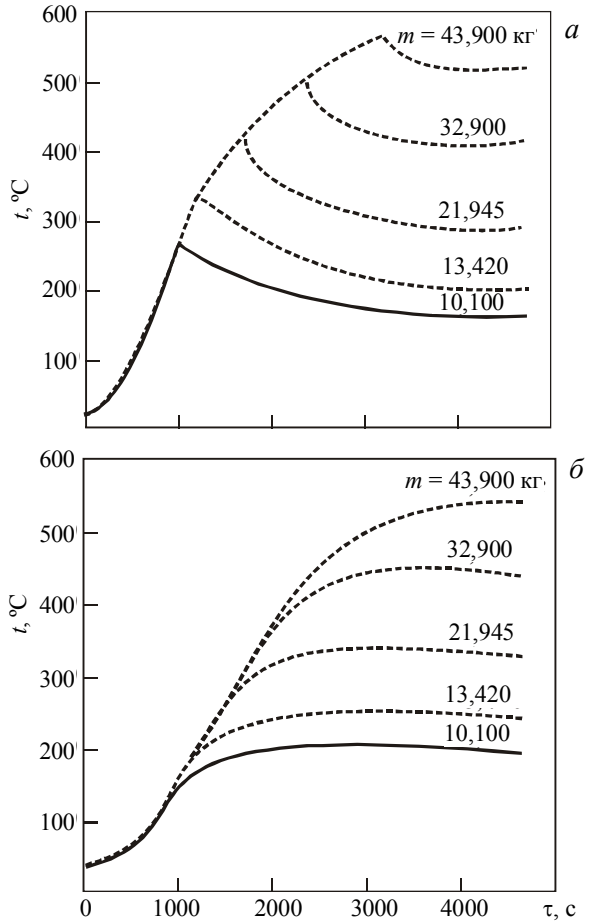



Рис. 24. Кинетика изменения температуры конструкционного материала (*а*) и температуры газообразных продуктов взаимодействия лития с воздухом (*б*) в корпусе термоядерного реактора при протечке лития из его жидкометаллических систем площадью 965 м$^2$, объем излившегося лития 250,0 м$^3$, исходная температура лития 500 ºC

С чистым кислородом литий взаимодействует весьма слабо (рис. 22). Взаимодействие лития с азотом протекает по экспоненциальному закону (рис. 23). Литий способен поглотить большое количество газообразного азота. При температуре >450 ºC литий воспламеняется в среде сухого азота. Все это не позволяет рассматривать азот в качестве защитной атмосферы в литиевых системах. Наличие в азоте кислорода (7—15%) или водорода (3—5%) снижает скорость взаимодействия лития с газовой средой практически до нуля. Присутствие влаги в азоте сильно ускоряет его взаимодействие с литием [5, 6].

Экспериментальное исследование взаимодействия значительных объемов лития с газами при высоких температурах показало следующее [16]. При взаимодействии открытой поверхности жидкого металла с воздухом при нормальной влажности происходит его горение, температура которого составляет 1000—1100 ºC и слабо зависит от исходной температуры лития. При взаимодействии лития с $CO_2$ температура горения может значительно превышать 1000 ºC. При горении на воздухе образуется большое количество продуктов горения в форме аэрозолей. Количество аэрозолей может составлять более 10% от исходного количества лития. Горение в среде азота происходит при более низкой температуре (<1000 ºC) и почти без образования аэрозолей. Инжекция капель лития в газовую среду является гораздо менее опасным видом аварийного взаимодействия [16].

Вопросы взаимодействия жидкого лития с воздухом при разгерметизации жидкометаллических систем реактора моделировались в работе [30]. Проведены параметрические исследования временных зависимостей изменения температуры материалов конструкций реактора и давления в его корпусе от исходной температуры лития, площади разлива из жидкометаллических систем и горения жидкого металла, массы лития, вылившегося при аварии. Наиболее сильным фактором, влияющим на рост температуры и давления, является масса разлившегося лития, варьировавшаяся при исследовании от 10 100 до 43 900 кг. На рис. 24 приведены временные зависимости различных параметров аварийного взаимодействия лития с воздухом для различных значений массы пролившегося лития.

На основании имеющегося опыта эффективное подавление процесса взаимодействия происходит при использовании инертного газа (аргона), вытесняющего реагирующий газ, или засыпании поверхности горения необходимым количеством графита в виде порошка или гранул.

**Взаимодействие лития с водой.** При взаимодействии лития с водой протекают следующие реакции:

$$Li + H_2O \rightarrow LiOH + 1/2H_2; \quad (26)$$

$$1/2H_2 + Li \rightarrow LiH;\ LiOH + 2Li \rightarrow Li_2O + LiH. \quad (27)$$

Ниже температуры плавления лития в основном протекает реакция (26). Реакции (27) протекают при повышении температуры [6].

Твердый литий в избытке воды взаимодействует с ней без расплавления и менее интенсивно, чем с другими щелочными металлами. Основную опасность в этом случае представляет выделяющийся водород, в смеси с воздухом образующий «гремучую» смесь. Жидкий литий на воздухе взаимодействует с водой с взрывом.

Развитие процесса взаимодействия зависит от соотношения масс лития и воды, скорости подвода реагентов и др. Взаимодействие лития с парами воды идет значительно медленнее. При инжектировании водяного пара (320 ºС) в избыток лития (580 ºС) его температура возрастает, но свободный водород не выделяется [16]. В среде инертного газа и в вакууме взаимодействие идет активно, но без взрыва. Попадание небольших количеств воды (~$1\cdot10^{-3}$%) на поверхность лития исследовалось при температуре 300 ºС [10]. При этом в вакуумном объеме наблюдался быстрый рост давления (рис. 25) и затем его медленный спад, обусловленный поглощением выделившегося водорода. Наилучшим способом предотвращения взаимодействия лития с водой является исключение ее из систем реактора.

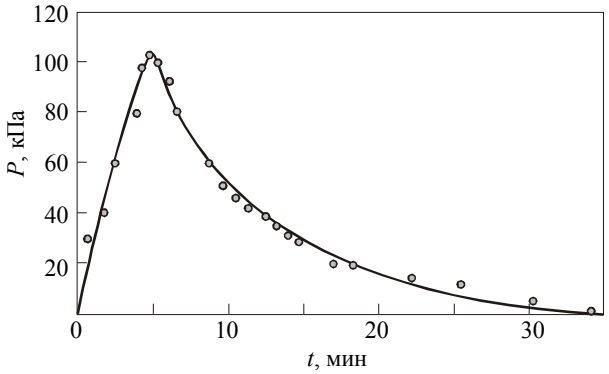



Рис. 25. Кинетика изменения давления в объеме над поверхностью лития при его взаимодействии с водой при 300 ºС; $m_{Li}/m_{H_2O} = 1{,}15\cdot10^{-5}/1$

**Взаимодействие лития с парами воды и кислородом в условиях токамака**. В вакуумных условиях плазменной камеры токамака открытая поверхность жидкого лития и литий, литий, осажденный на стенке, проявляют высокую способность к взаимодействию с остаточными газами.

Процесс геттерирования литием вакуумной среды токамака был одним из основных факторов, приводящих к снижению $Z_{эф}$ в экспериментах на TFTR, T-11M, NSTX, CDX-U, FTU, T-10 [31—34]. Так, в литиевых экспериментах на токамаке T-10 наблюдалось снижение интенсивности линии кислорода в 5—10 раз (рис. 26) после литиизации камеры [34]. Еще более сильное подавление линий примесей (молибден, кислород) наблюдалось при литиизации «металлического» токамака FTU (рис. 27) [35]. По данным масс-спектрометрических измерений, представленных на рис. 28, видно, как при прогреве открытой поверхности лития в вакуумной камере ($P \sim 10^{-4}$ Па) меняются парциальные давления паров воды и водорода. Повышение температуры ведет к активному поглощению паров воды с выделением водорода.

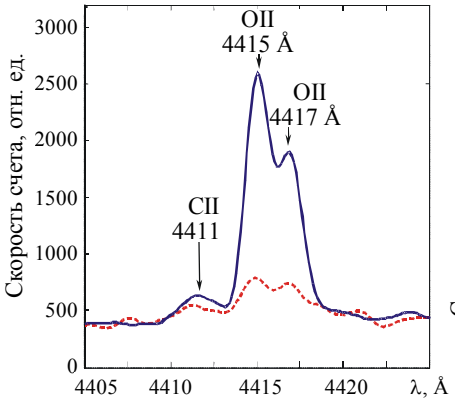



Рис. 26. Интенсивность спектральных линий кислорода и углерода до (— — № 44613) и после (---- — № 43329) литиизации вакуумного корпуса токамака T-10

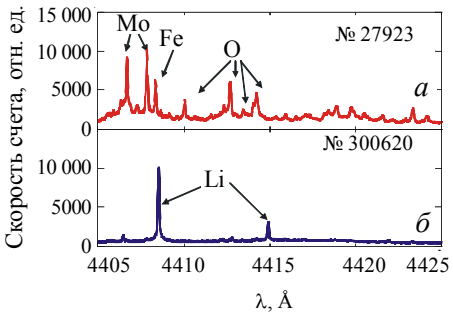



Рис. 27. Интенсивность спектральных линий молибдена, железа, лития и кислорода до (*а*) и после (*б*) литиизации вакуумного корпуса токамака FTU

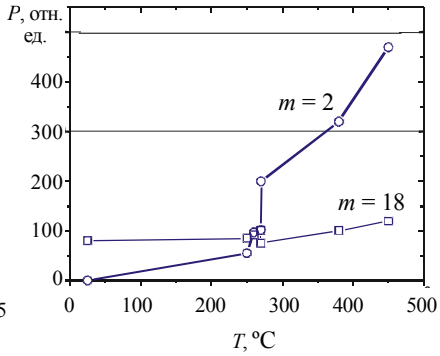



Рис. 28. Парциальное давление паров воды $H_2O$ (□, $m$ = 18) и водорода $H_2$ (○, $m$ = 2) как функция температуры лития при его контакте с газовой средой камеры токамака T-11M

**Вопросы технологии использования лития в теплообменных системах.** Реальная осуществимость литиевого реактора токамака, кроме прочего, базируется на существующем опыте практического использования лития и других щелочных металлов в экспериментальных и промышленных энергетических установках. За десятилетия работы решены практически все основные вопросы технологии жидкого лития [6, 21].

Понятие технологии лития включает в себя:

— способы безопасной транспортировки химически активного легкоплавкого металла от производителя до места его использования;

— методы очистки жидкого металла до уровня, необходимого для его заправки в рабочие жидкометаллические системы;

— методы очистки и поддержания заданного химического состава в процессе работы жидкометаллических систем;

— методы представительного пробоотбора жидкого металла для контроля его химического состава;

— методы химического анализа отобранных проб металла;

— методы непрерывного контроля (мониторинг) за содержанием примесей в потоке жидкого металла;

— методы очистки жидкометаллических трактов от остатков металла после его слива перед ремонтом или демонтажем установки (нейтрализация);

— переработка и перевод отходов нейтрализации и других технологических операций в химически нейтральные, безопасные формы;

— меры по обеспечению безопасной эксплуатации жидкометаллических технологических систем.

Как хорошо видно из мирового опыта создания и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, вопросы производства, транспортировки и заправки в рабочие емкости сотен тонн натрия, более химически активного металла, чем литий, успешно решены.

Активное взаимодействие лития с водой и воздухом, что рассматривается как единственный недостаток лития, является его положительным свойством с точки зрения очистки литиевых систем. Разработанные методы очистки водяным паром, водосодержащими смесями позволяют, как показывает опыт, безопасно и с высокой производительностью очищать от остатков лития крупномасштабные, сложной конфигурации системы. Это имеет важное значение для работы с такими системами, как бланкетные и диверторные, в литиевом реакторе.

Для функционирования жидкометаллических систем литиевого реактора необходимо будет поддерживать содержание примесей в нем на необходимом уровне. Этот уровень определяется влиянием некоторых примесей на коррозионную активность лития по отношению к конструкционным материалам, активацией жидкометаллических трактов, эффективностью процессов выделения трития, необходимыми условиями для формирования и самозалечивания электроизоляционных покрытий и другими факторами. В настоящее время разработаны и экспериментально исследованы высокоэффективные методы регулирования концентрации примесей в литии [6].

Методы очистки условно делятся на две группы. В первую группу так называемых «холодных методов» очистки входят физико-механические методы — отстаивание, центрифугирование, фильтрация, очистка холодными «ловушками». К методам второй группы «горячей» очистки относятся геттерирование, дистилляция.

Методы первой группы основаны на механическом отделении имеющихся в расплаве твердофазных или выкристаллизовавшихся из жидкометаллического раствора примесей. Поскольку величина растворимости примесей уменьшается с температурой, очевидно, что эти методы реализуются при температурах, близких к температуре плавления металла. Предел растворимости примеси при температуре плавления является теоретическим пределом глубины очистки.

Первым шагом подготовки лития обычно является обезгаживание вакуумированием при первичном разогреве и плавлении лития в приемной емкости. При этом удаляются адсорбированные и растворенные газы, происходит отгонка летучих фракций консервирующих и других технологических сред.

При отстаивании лития, проводящемся при температуре, близкой к температуре плавления, и в поле температур, предотвращающем конвективное перемешивание, производится отделение твердофазных частиц примесей, отличающихся по плотности от жидкого металла. Плотность при 15—20 ºС оксида,

нитрида, карбида и гидрида лития составляет соответственно 2,01, 1,29—1,38, 1,65, 0,78—0,82 г/см$^3$. Этот метод эффективен для очистки лития от кислорода. При своей очевидной простоте метод обладает недостатками: неуплотняемый осадок примесей требует специальных мер по забору чистого металла без подсоса примесей, большого времени для очистки.

При фильтрации отделяются твердые частицы примесей с помощью фильтрующих элементов — металлической стружки, сетки, спеченных порошков, металлокерамики и др. На практике обычно используют дифференциальные фильтры с постепенно убывающим размером пор по ходу потока очищаемого металла или каскад фильтров, начиная от крупноячеистых (100 мкм и более) и заканчивая фильтрами с размером пор 5—10 мкм. Фильтры должны быть стойкими в среде жидкого металла и обладать возможностью регенерации (обычно промывкой жидкого металла). Этот метод имеет низкую производительность и пригоден для очистки небольших объемов металла.

Эффективным, но технически сложным является метод центробежной очистки, реализуемый путем центрифугирования или очистки с помощью циклонов.

Наиболее простым, эффективным и производительным является метод очистки холодными ловушками. Процесс очистки состоит из охлаждения жидкого металла до температур, близких к температуре его плавления, с образованием пересыщенного раствора и инициированием процесса кристаллизации примесей и удаления выпавших кристаллов из потока металла. В зависимости от методов удаления твердофазных частиц, системы охлаждения существуют различные конструкции таких ловушек. Применение в проточных ловушках последовательно отстаивания и фильтрации позволяет поддерживать высокие скорости движения металла, так как на фильтре скапливается меньше осадка. Особенностью работы зоны отстаивания ловушки в отличие от обычного отстаивания является наличие постоянного движения жидкого металла через зону отстаивания. Эффективная очистка в зоне отстаивания осуществляется в основном не за счет осаждения взвеси, а за счет процессов кристаллизации примесей на холодных поверхностях с образованием плотного компактного осадка. Увеличение холодной поверхности и введение дополнительных центров кристаллизации повышают эффективность работы ловушки. Упрощенной, но достаточно эффективной модификацией холодной ловушки является диффузионная ловушка.

Горячая очистка лития позволяет получить наилучшие результаты по снижению концентрации в нем примеси азота за счет поглощения его химически активным элементом — геттером. Для геттерирования примесей азота и углерода применяют титан и цирконий при температуре порядка 700 ºС. Водород из лития поглощается иттрием. Такие ловушки обладают ограниченной емкостью и могут интенсифицировать коррозионные процессы в литиевых системах. Горячие ловушки могут использоваться совместно с холодными как вспомогательные.

Важным вопросом технологии лития являются методы достоверного контроля его химического состава в процессе работы литиевых систем.

Методы анализа делятся на две группы — периодического и постоянного контроля. Периодический контроль предусматривает отбор проб жидкого металла и их последующий анализ физико-химическими методами. Наиболее ценную информацию о состоянии жидкометаллической системы могут дать методы непрерывного контроля содержания примесей в жидком металле. Избирательным и чувствительным инструментом непрерывного контроля является электрохимический датчик. Метод основан на измерении ЭДС гальванического концентрационного элемента, состоящего из анализируемого жидкометаллического раствора, и электрода сравнения. Для контроля кислорода в потоке лития предлагается использовать ячейку с твердым электролитом $ThO_2$, стабилизированным $Y_2O_3$. Для контроля содержания примеси азота в литии предлагается использовать твердый электролит на основе нитрида алюминия или электрохимической ячейки с жидким электролитом, например, LiCl—LiF—$Li_3N$.

Для контроля содержания примеси водорода (дейтерия, трития) и углерода в литии разработаны датчики на основе диффузионных мембран. В качестве материалов таких мембран рассматриваются ниобий или чистое железо, устойчивые к воздействию лития. Мембрана из железа может быть использована для контроля содержания углерода в литии. В этом случае внутренняя сторона мембраны окисляется до образования FeO и диффундирующий из лития углерод образует CO. По содержанию этого со-

единения или образовавшегося из него на катализаторе метана можно определить концентрацию углерода. Мембранные датчики могут работать в динамическом или равновесном режиме.

Для контроля содержания в литии металлических примесей с атомным номером от 20 до 40 с чувствительностью на уровне $1 \cdot 10^{-3}$% можно использовать абсорбционный рентгеноспектральный метод анализа жидкого лития, который разработан и использован для анализа лития при высоких температурах без операции пробоотбора [22].

Имеющаяся база данных о свойствах и технологии лития, многолетний опыт его практического освоения позволяют с уверенностью говорить о возможности создания и надежной эксплуатации крупномасштабных литиевых систем термоядерного реактора.

**Основные принципы разработки безопасных литиевых систем.** Одним из факторов, определяющих безопасность литиевого реактора, является взаимодействие лития и других материалов с водой, воздухом и другими средами. Литий взрывоопасен при соприкосновении с водой, активно взаимодействует с воздухом, углекислым газом и азотом, взаимодействует с бетоном. Эти вопросы изучены и проанализированы. В литиевом термоядерном реакторе вопросы безопасности, связанные с возможным взаимодействием жидкого лития с водой, снимаются с рассмотрения как критические, так как в пределах реактора воды в системах охлаждения и защиты не должно предусматриваться в принципе. Охлаждение литиевых систем может проводиться, например, расплавом NaK эвтектического состава с низкой температурой (–12 ºС) затвердевания. Передача тепла в систему преобразования должна проводиться по трехконтурной схеме. Для жидкометаллических теплоносителей эта схема давно и успешно используется в реакторах на быстрых нейтронах.

В целом последствия попадания и загорания лития в корпусе реактора не являются катастрофическими. Более серьезные последствия могут наблюдаться при разлитии лития за пределы вакуумного корпуса реактора.

Обеспечение безопасного использования жидкого лития, кроме принципиальных решений, должно обеспечиваться выполнением при проектировании реактора следующих основных принципов [16, 21]:

— использование многооболочечных конструкций в зоне разделения полостей, содержащих жидкий металл и воду, с контролем среды в межоболочечных объемах;

— реакторное помещение может быть заполнено инертным по отношению к литию газом (аргон, гелий), что полностью исключит возгорание лития при его возможной утечке и будет дополнительным барьером по отношению к другим вредным факторам (проникновение трития и др.);

— система теплоотвода, где циркулирует литий, должна проектироваться по секционному принципу, когда литий циркулирует по параллельным веткам (секциям), а подводящие и отводящие трубопроводы к секциям оснащены клапанами, отсекающими секции от напорной и сливной магистралей при разгерметизации секции (капельные протечки или прорыв двух оболочек);

— реакторная камера должна оснащаться предохранительными устройствами, соединяющими при повышении давления в камере выше допустимого полость камеры с полостями емкостей локализации продуктов откачки, включая тритий. Учитывая высокую проницаемость изотопов водорода через стенки и сварные швы, все объемы, содержащие тритий, включая реакторную камеру, должны иметь двухоболочечную конструкцию с контролем среды между оболочками;

— гипотетическая авария, связанная с разрушением или разгерметизацией рабочей камеры за счет как внешнего (наружный взрыв и т.д.), так и внутреннего воздействия (разрыв трубопроводов всех секций), должна быть предусмотрена проектом помещения, где размещается реактор, зоной отчуждения и соответствующим планом технических мероприятий.

Использование в реакторе лития и конструкционных материалов с быстро спадающей наведенной активностью (например, сплавы на основе ванадия) обеспечивает безопасность с точки зрения активации и накопления радиоактивных отходов.

Активация жидкометаллических систем будет определяться активацией примесей, растворенных в литии. Кроме того, использование лития, поглощающего нейтроны, способствует снижению активации конструкционных материалов реактора.

Одним из принципиальных требований к безопасности термоядерного реактора является ограничение на полное содержание трития, аккумулированного в материалах и системах реактора. Литий акку-

мулирует в себе нарабатывающийся тритий и не «отдает» его материалам реактора (коэффициент перераспределения водорода и его изотопов между жидким металлом и конструкционными материалами <<1). Это позволяет практически весь тритий переносить циркулирующим литием в системы извлечения. Особенности взаимодействия лития с плазмообразующими газами также позволяют рассчитывать на эффективное регулирование содержания трития в литиевых системах.

## ЛИТИЕВЫЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ СИСТЕМЫ

Разработка проектов реакторов ИТЭР и ДЕМО показала, что обычные конструкторские подходы и материаловедческие решения проблем первой стенки, диверторных пластин и других внутрикамерных элементов токамака, обращенных к плазме, не обеспечивают условия стационарного горения плазмы. Лучшие сорта материалов на основе бериллия, графита и вольфрама обладают рядом недостатков при использовании в условиях ИТЭР с присущими для него режимами неустойчивостей плазмы (срывы, ELM) [36, 37]. Энергетические термоядерные реакторы с высокими стационарными и пиковыми энергетическими нагрузками не могут быть реализованы при использовании обычных твердых материалов, контактирующих с плазмой. Проблемы, возникающие вследствие деградации материалов, захвата и накопления трития продуктами эрозии могут быть преодолены с помощью применения жидких металлов.

**Преимущества, структура и свойства литиевых капиллярно-пористых систем.** Идея использования жидкого лития в токамаках получила развитие на основе использования сил поверхностного натяжения в капиллярных каналах так называемых капиллярно-пористых систем (КПС) [38]. Этот композитный материал с жидкой и твердой составляющими может рассматриваться как новый класс материалов для токамаков, что позволит реализовать все преимущества жидких металлов и преодолеть инженерные проблемы при их использовании. Характерные свойства КПС основаны на зависимости капиллярного давления $P_c \sim 1/R(r_{эф}, Q)$ в каналах от радиуса мениска жидкого лития $R(r_{эф}, Q)$ на поверхности КПС, который зависит от радиуса пор $r_{эф}$ и величины плотности падающего на поверхность потока энергии $Q$ [39]. В результате капиллярные силы обеспечивают образование, стабилизацию и однородное распределение пленки жидкого металла на поверхности КПС (саморегулирующаяся система). Величина капиллярного давления чрезвычайно чувствительна к изменениям в локальном распределении тепловой нагрузки на поверхности, и его различие является причиной восстановления поверхности лития, т.е. подачи лития в зоны, интенсивно взаимодействующие с плазмой. Эрозия лития с поверхности КПС при испарении, разбрызгивании и ионном распылении компенсируется (саморегенерация) в количестве, точно соответствующем потерям (саморегулирование), благодаря постоянной подаче жидкого лития за счет капиллярных сил. Эродируемый литий может легко конденсироваться и быть захваченным на поверхности КПС вне зоны взаимодействия с плазмой и будет поступать в зону взаимодействия без применения специальных насосов. Поэтому литий не будет накапливаться (например, как пыль) в отличие от твердого материала.

Способность КПС обеспечивать все характерные свойства определяется выполнением для всех точек поверхности следующего неравенства:

$$P_c \geq \Delta P_L + \Delta P_Q \, \Delta P_F + \Delta P_{MHD}, \tag{28}$$

где $P_c$ — капиллярное давление в КПС; $\Delta P_L$ — гидравлические потери в КПС; $\Delta P_Q$ — гидростатический перепад давления; $\Delta P_F$ — перепад давления на испаряющей поверхности вследствие фазового превращения жидкость—пар; $\Delta P_{MHD}$ — потери давления вследствие МГД-эффекта при течении лития в присутствии магнитного поля. Члены неравенства могут быть оценены из следующих соотношений:

$$\Delta P_L = \frac{8 m \mu L_{КПС}}{S_{КПС} \varepsilon r_{эф}^2 \gamma}, \tag{29}$$

где $m$ — скорость испарения; $\mu$ — динамическая вязкость лития; $L_{КПС}$ — длина КПС; $S_{КПС}$ — площадь поперечного сечения; $\varepsilon$ — объемная пористость; $h$ — высота столба лития; $\Delta P_F$ может быть рассчитана с хорошей точностью как половина давления литиевого пара при соответствующей температуре поверхности;

$$\Delta P_{\text{МГД}} = \frac{B^2 L_{\text{КПС}} \upsilon \left( l + \frac{l}{\delta} \right)^2 \delta^2}{\rho l^2}, \qquad (30)$$

где $B$ — индукция магнитного поля; $v$ — скорость потока лития; $\delta$ и $l$ — параметры КПС; $\rho$ — электрическое сопротивление лития. Это соотношение было получено в результате экспериментальных исследований влияния МГД-эффектов на течение лития в КПС [39]. Оценки показывают, что капиллярное давление $P_c$ может достигать ~(2—3)$10^5$ Па при разумном значении $r_{эф}$, равном около 1—2 мкм. Это превышает сумму перепадов давлений, составляющих $10^4$ Па для токамака при величине магнитного поля около 6 Тл. Поэтому КПС будет функционировать без повреждений в течение нормального разряда. Возможность КПС обеспечить удержание жидкого лития на поверхности в случае неустойчивости плазмы определяется как $P_c \geq P_{ЭМ}$, где $P_{ЭМ}$ — импульс давления в жидком литии, индуцированный электромагнитными силами при срыве плазмы.

Различные пористые материалы могут служить в качестве основы КПС, но должны отвечать целому ряду специфических и часто противоречивых требований. Структура КПС должна состоять из открытых пор при специальном распределении их размера по сечению материала. Минимальный размер пор на поверхности и достаточно большие поры в теле материала или использование артериальной структуры должны обеспечивать максимальное капиллярное давление при низком гидравлическом сопротивлении. Материал основы КПС должен иметь хорошую совместимость с жидким литием (высокую коррозионную стойкость, нечувствительность к охрупчиванию жидким металлом), низкую чувствительность механических свойств к радиационным повреждениям, хорошую смачиваемость жидким металлом, хорошую теплопроводность, высокие объемные и поверхностные коэффициенты пористости, минимальный размер структурных элементов основы КПС. В этом смысле материалы на основе металлического волокна из Mo или W, такие, как сетка (рис. 29, *а*, *б*) или войлок (рис. 29, *в*) являются наиболее предпочтительными. Вид заполненной литием КПС представлен на рис. 29, *г*.

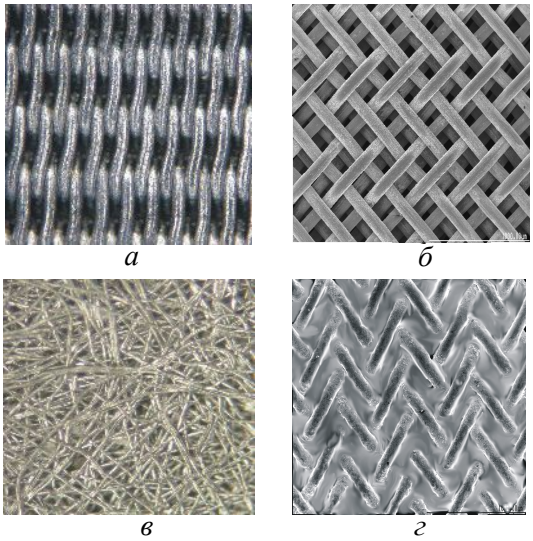



Рис. 29. Внешний вид КПС на основе сеток (*а*, *б*), металлического войлока (*в*); КПС, смоченная литием (*г*)

Следует отметить, что коэффициент теплопроводности литиевой КПС $\lambda(T)$ в зависимости от ее структуры может быть рассчитан посредством двух моделей, т.е. модели параллельных слоев или модели последовательных слоев. В первом случае $\lambda(T) = (1 - \varepsilon)\lambda_c(T) + \varepsilon\lambda_{Li}(T)$, где $\lambda_c(T)$ — коэффициент теплопроводности материала КПС; $\lambda_{Li}(T)$ — коэффициент теплопроводности лития. Во втором случае $\lambda(T) = [(1 - \varepsilon)/\lambda_c(T) + \varepsilon/\lambda_{Li}(T)]^{-1}$. Для КПС из нескольких слоев сетки коэффициент теплопроводности выражен в виде соотношения $\lambda(T) = \lambda_{Li}(T)(\beta - \varepsilon)/\beta + \varepsilon$, где $\beta = [(1 + \lambda_c(T)/\lambda_{Li}(T)]\,[1 - \lambda_c(T)/\lambda_{Li}(T)]^{-1}$.

Неизбежное наличие температурных градиентов при воздействии мощных тепловых потоков не приведет к возникновению предельно допустимых механических напряжений в структуре литиевых КПС, следовательно, никакое термическое растрескивание и термическая усталость не будут иметь место в отличие от лучших твердых материалов [1, 21, 38]. Максимально допустимая тепловая нагрузка на поверхность КПС из металлического волокна (диаметр волокна около 10—20 мкм) составляет более $10^3$ МВт/м$^2$. Повреждение КПС в принципе носит характер локального повреждения отдельных волокон и в противоположность растрескиванию монолитного материала не влияет на целостность всей структуры. Прочность КПС $\sigma_{КПС}$ зависит от параметра пористости $\varepsilon$ и может определяться как $\sigma_{КПС} = \sigma_o\,(1 - \varepsilon)^2$, где $\sigma_o$ — прочность материала на основе КПС. Учитывая, что КПС не является материалом опорных конструкций, ее прочность находится на вполне приемлемом уровне. Ударная вязкость КПС выше, чем у монолитного материала, в десятки раз.

Крепление КПС к опорным конструкциям не вызывает проблем благодаря ее превосходной релаксационной способности. Кроме того, этот материал является замечательным амортизатором.

Проблема деградации свойств при радиационном облучении и устойчивости к разбуханию практически не возникает для металлических волокнистых материалов основы КПС из радиационно-стойких сплавов.

При рассмотрении возможности использования литиевой КПС в качестве материала защиты внутренних элементов токамака следует принять во внимание следующие важные соображения [1]. Естественный путь увеличения срока службы материалов, обращенных к плазме, заключается в снижении действующих удельных тепловых нагрузок путем перераспределения теплового потока на большую площадь посредством механизма испарения-конденсации и переизлучения. Первый метод при использовании лития обеспечивает отвод тепловых потоков в сотни МВт/м$^2$, так как литий обладает высокой скрытой теплотой испарения. Он весьма эффективен для защиты внутренних элементов при срывах плазмы, возникновении пучков ускоренных электронов и униполярных дуг. Вторым механизмом снижения локальных тепловых нагрузок является переизлучение на атомах лития в приповерхностном слое. Так же, как в концепции дивертора с газовой мишенью, в случае использования литиевых КПС такая мишень образуется естественным путем и контролируется регулированием рабочей температуры поверхности, контактирующей с плазмой. Таким образом, энергия будет перераспределяться на большую площадь путем излучения, и тепловая нагрузка на поверхность материалов будет уменьшаться. Отвод энергии от внутрикамерного элемента будет осуществляться теплопроводностью к системе охлаждения, где теплообмен с теплоносителем будет протекать в мягком режиме. Важным является и то, что температура плавления материала основы КПС не может быть в принципе достигнута, когда КПС заполнена литием. Кроме того, как это было показано в экспериментах, КПС обладает способностью сохранять свои свойства в условиях частичного повреждения.

Накопление трития в литиевой КПС можно регулировать путем медленной циркуляции лития при поддержании концентрации трития на требуемом уровне с помощью систем извлечения.

Создание литиевых КПС не требует больших затрат, и технология их изготовления отработана. Поэтому КПС можно рассматривать как новый класс материала, обращенного к плазме, с уникальными свойствами, удовлетворяющего многочисленным требованиям.

**Экспериментальное основание применения литиевой КПС в токамаке.** *Течение лития через капиллярно-пористую систему в поперечном магнитном поле.* Возможность применения литиевой КПС в термоядерном реакторе-токамаке требует экспериментального исследования магнитной гидродинамики течения лития в сильном магнитном поле. До настоящего времени МГД-эффект в капиллярно-пористых системах не был изучен в достаточной степени. Для решения этой проблемы были проведены эксперименты при индукции поперечного магнитного поля до 1,6 Тл, которые позволили исследовать течение лития в образцах КПС различной структуры [40].

Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda_{КПС}$ при течении лития в КПС определяется по известному соотношению [39]

$$\lambda = \Delta P\left[\left(l/d_{\text{Н}}\right)\left(\rho V^2/2\right)\right]^{-1}, \tag{31}$$

где $\Delta P$ — перепад давления в экспериментальной секции; $l$ и $d_{\text{Н}}$ — длина образца КПС и диаметр волокна материала основы; $\rho$ и $V$ — плотность и средний расход лития. Параметр МГД-взаимодействия $N$ определяется из следующего соотношения:

$$N = \text{Ha}^2/\text{Re}, \tag{32}$$

где Ha — число Гартманна; Re — число Рейнольдса.

Для КПС на основе волокон характерный гидравлический диаметр равен диаметру волокна $\delta$ [39].

Расход лития для КПС оценивается по соотношению $V_{КПС} = V(1 + h_c)^2/h_c^2$, где $h_c$ равен $h/\delta$, а $h$ — размер пор КПС (в этом эксперименте $h$ = 0,5 мм, $\delta$ = 0,2 мм). Экспериментально определенное гидравлическое сопротивление потоку лития в КПС в зависимости от МГД-параметра $N$ показано на рис. 30. Результаты экспериментов в поперечном магнитном поле с образцами КПС в виде сетчатых

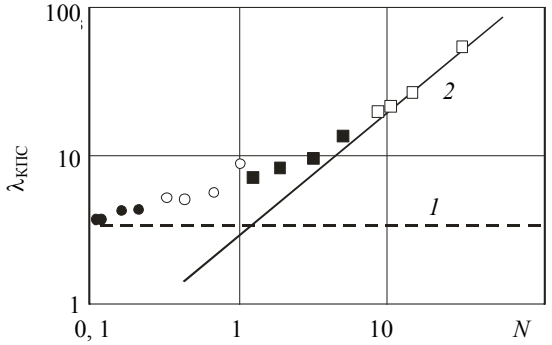



Рис. 30. Зависимость коэффициента сопротивления литиевого потока $\lambda_{КПС}$ в капиллярно-пористой системе от параметра магнитогидродинамического взаимодействия $N$: *1* — Ha = 0; *2* — $\lambda_{КПС} = 2N$; ● — $B$ = 0,3 Тл, Ha = 5,1; ○ — $B$ = 0,6 Тл, Ha = 10,3; ■ — $B$ = 1,0 Тл, Ha = 17,1; □ — $B$ = 1,6 Тл; Ha = 27,3

матов легко интерпретируются на основе известных законов магнитной гидродинамики, если рассматривать КПС как активатор турбулентных пульсаций потока лития. Наличие КПС в трубке приводит к подавлению больших пульсаций. Поэтому при менее $N \sim 1$ эффект подавления пульсаций значительно сильнее, чем эффект Гартманна, и рост $\lambda_{КПС}$ незначителен. Влияние эффекта Гартманна увеличивается с ростом $N$, и при $N > 10$ зависимость $\lambda_{КПС}$ от $N$ становится линейной. Следует заметить, что определение ламинарного и турбулентного течения для КПС является довольно условным. Хотя все экспериментальные точки находятся в зоне Re < 250, поток не может рассматриваться как ламинарный в чистом виде, так как литий перетекает через препятствия, расположенные хаотично в сетчатом мате. Однако, как видно на рис. 30, линейная зависимость коэффициента сопротивления в КПС имеет место при $N \sim 10$. В случае до $N \sim 1$ увеличение $\lambda_{КПС}$ незначительно, а при N > 10 экспериментальные данные соответствуют практически расчетной зависимости $\lambda_{КПС}$ от $N$ для трубок с высокой проводимостью стенок и не зависят от параметров сетки. Это можно объяснить значениями На >> 1, $C$ >> 1 для КПС. Следовательно, для большинства практических случаев, если $N > 10$, то можно использовать хорошо известное соотношение $\lambda_{КПС} = 2N$ для расчета гидравлического сопротивления КПС в сильных магнитных полях. Когда $N < 1$, зависимость $\lambda_{КПС}$ от $N$ слабо выражена и величина коэффициента сопротивления всего лишь в 1,5—2 раза выше его значения при отсутствии магнитного поля.

Экспериментально определенная зависимость коэффициента сопротивления при течении лития в КПС находится в хорошем соответствии с известными МГД-соотношениями для труб и каналов. Учитывая указанные особенности КПС, МГД-эффекты в приемных элементах дивертора и первой стенки реактора-токамака могут быть оценены с достаточной степенью достоверности.

*Исследование устойчивости литиевых КПС при воздействии стационарных тепловых нагрузок.* Способность литиевой КПС выдерживать высокие стационарные тепловые нагрузки без повреждения была подтверждена в экспериментах с различными модификациями мишеней (рис. 31) на установке «СПРУТ-4» при воздействии электронного пучка (поперечное сечение пучка $S = 3$ см$^2$). Были исследованы скорость испарения лития из мишени (рис. 32), энергетический баланс процесса (рис. 33) и

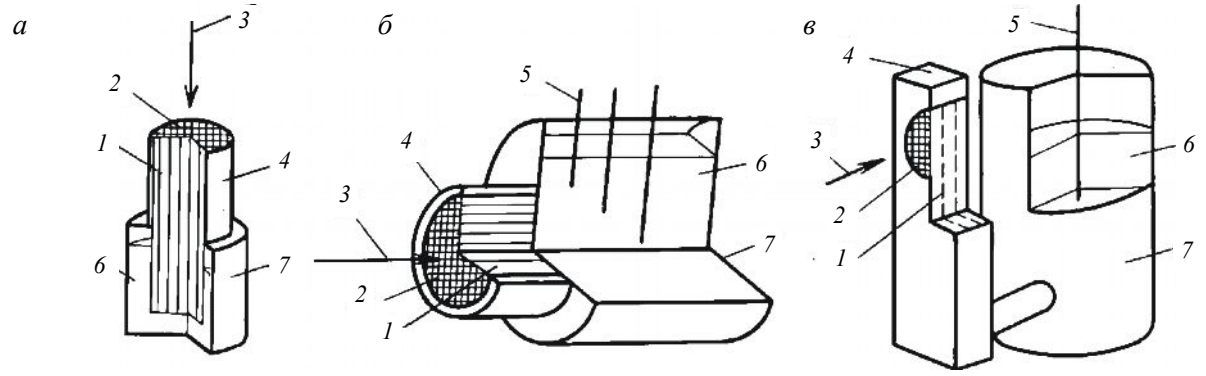



Рис. 31. Мишени вертикального (*а*), горизонтального (*б*) и комбинированного (*в*) положения литиевой КПС для испытания с помощью электронно-лучевой пушки:*1* — транспортная капиллярная система; *2* — энергонагруженная капиллярно-пористая поверхность; 3 — электронный пучок; *4* — корпус мишени; *5* — уровнемер; *6* — жидкий литий; *7* — питательная емкость

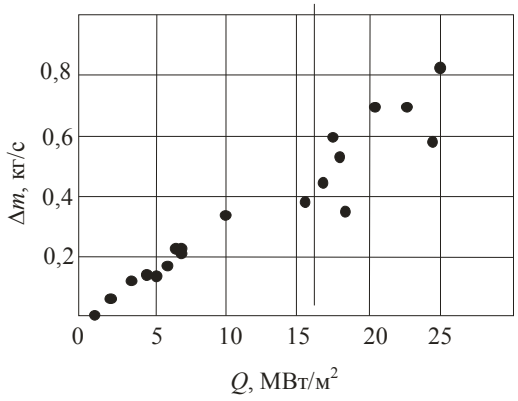



Рис. 32. Зависимость скорости уноса частиц лития с поверхности от плотности энергии

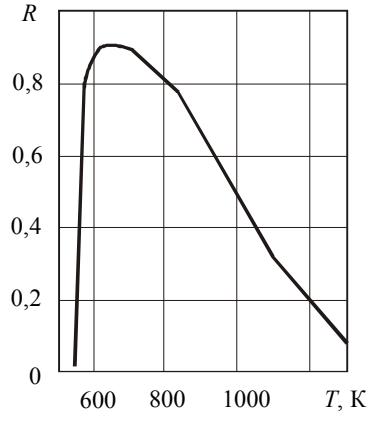



Рис. 33. Температурная зависимость доли теплового потока $R$, отводимого от поверхности КПС за счет теплопроводности

температура поверхности КПС в зависимости от величины удельного теплового потока, изменявшегося в диапазоне 1—25 МВт/м$^2$. Температура поверхности КПС зависела от падающего теплового потока и составляла 350—970 ºС. Отношение энергии, отведенной посредством испарения, и поступающей энергии достигло 0,7. Спектроскопическое исследование области свечения над поверхностью мишеней показало наличие излучения нейтрального и ионизованного лития при полном отсутствии спектральных линий материала структуры КПС (молибден). Эксперименты показали [40, 41], что мишени могут выдержать без разрушения поверхности КПС длительное тепловое воздействие при удельных потоках до 25 МВт/м$^2$ и кратковременное при нагрузках до 50 МВт/м$^2$.

Успешная работа мишени, снабженной системами водяного охлаждения и подачи лития, была продемонстрирована в режиме стационарного (до 3 часов) воздействия тепловых потоков удельной мощностью 1—10 МВт/м$^2$. В этом случае температура поверхности не превышала 540 ºС. Общая масса лития, испарившегося с поверхности КПС в течение этих экспериментов, ~0,8 кг, и снижения работоспособности КПС не наблюдалось. Унос лития с поверхности компенсировался подачей лития под действием сил поверхностного натяжения из питающей емкости. Время работы такой мишени было ограничено лишь количеством лития в питающей емкости. Способность КПС сохранять функциональные свойства даже после ее частичного повреждения подтверждалась в эксперименте с повторным заполнением КПС после ее осушения при исчерпании запаса лития.

Полученные результаты доказывают, что литиевая мишень на основе КПС может эффективно работать в стационарных условиях при высоких энергетических нагрузках без нарушения своей исходной структуры.

*Исследование поведения литиевых КПС в условиях, моделирующих ELM и срывы.* Возможность выдерживать высокие тепловые нагрузки при срыве и ELM без повреждения и значительной эрозии является одной из важных характеристик материалов, обращенных к плазме токамака. Влияние такого рода воздействий на литиевую КПС было смоделировано с помощью потока дейтериевой плазмы в плазменных ускорителях КСПУ, МК-200UG и установке «Плазменный фокус» [42—44]. Условия экспериментов представлены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. **Условия эксперимента**

| Параметр | Установка | | |
|---|---|---|---|
| | КСПУ | МК-200UG | «Плазменный фокус» |
| Плотность энергии, МДж/м$^2$ | 4—5 | 15 | 60 |
| Продолжительность импульса, с | $5\cdot10^{-4}$ | $4\cdot10^{-5}$ | $10^{-6}$ |
| Плотность плазмы, см$^{-3}$ | $(2—5)10^{16}$ | $(2—6)10^{15}$ | $\sim10^{18}$ |
| Температура, эВ | 10—100 | 100—200 | 30 |
| Диаметр потока плазмы, мм | 60 | 40—80 | 10 |
| Количество импульсов | 22 | 17 | 40 |

Для экспериментального исследования были использованы различные мишени на основе литиевых КПС (рис. 34). Маты из сетки на основе молибденовой проволоки диаметром 0,1 мм и проволоки из нержавеющей стали Х18Н10 диаметром 0,03—0,2 мм были использованы в качестве материала основы КПС с радиусом пор 15—200 мкм. Первоначальная температура мишеней изменялась в интервале от 20 до 350 ºС. Таким образом, имелась возможность исследовать взаимодействие плазмы с мишенью, в которой литий находился в твердом и жидком состоянии. Мишени на основе традиционных твердых металлов (W, Mo, V, сталь 18—10, Li) и КПС (без лития) были испытаны для сравнения их поведения с мишенями, заполненными литием. Экспериментальные установки были оснащены оборудованием для спектроскопических исследований и изучения процессов капельной эрозии методом лазерного рассеяния.

*а* *б*

Рис. 34. Мишени для испытания литиевых КПС при плазменном облучении на установках КСПУ (*а*) и МК-200UG (*б*)

Никаких изменений поверхности КПС, заполненных литием, не было обнаружено после воздействия многочисленных плазменных им-

пульсов (рис. 35). В отличие от этого для твердых металлов было характерно образование явно выраженного рельефа на оплавленной поверхности образцов (V, сталь Х18Н10Т, Li) и растрескивание (Mo, V, сталь Х18Н10Т) даже после одного плазменного импульса (рис. 36, *а*, *б*). КПС без лития была полностью разрушена после одного плазменного импульса (рис. 36, *в*).

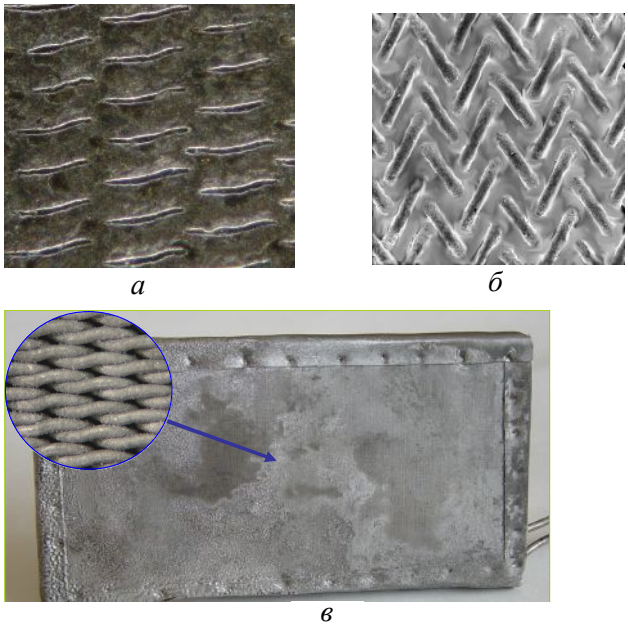



Рис. 35. Микрофотография поверхности КПС с жидким литием после плазменного взаимодействия в КСПУ (*а*, *б*) после 22 импульсов и в МК-200UG (*в*) после 17 импульсов: *а*, *в* — сетка из стали Х18Н10Т при $r_{эф}$ = 75 мкм

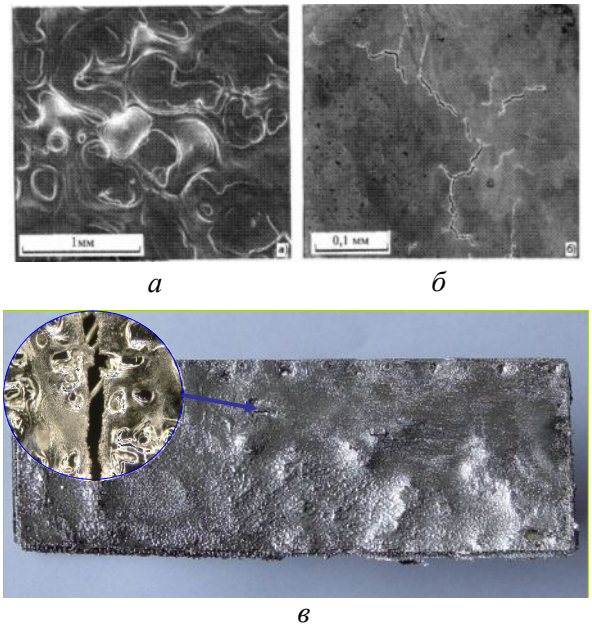
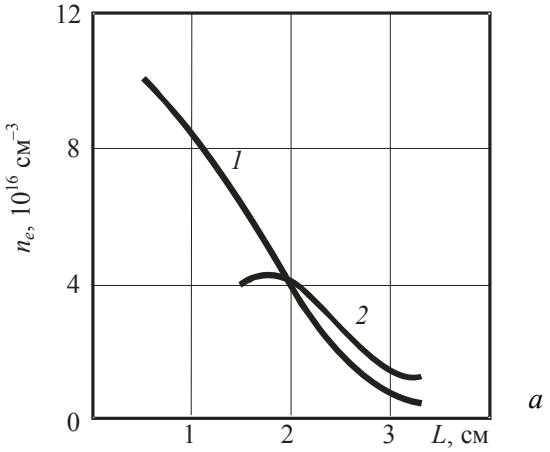



Рис. 36. Микрофотография твердой пластины из V и поверхность КПС после плазменного взаимодействия за 1 импульс в КСПУ (*а*, *б*) и в МК-200UG, сухая решетка из стали Х18Н10Т при $r_{эф}$ = 15 мкм (*в*)

Следует отметить, что в процессе воздействия потока плазмы наблюдались образование защитного слоя около поверхности мишени и капельная эрозия. Эксперименты показали, что перед поверхностью мишени образуется плотный слой литиевой плазмы толщиной 40—50 мм и $n_e \sim 10^{17}$ см$^{-3}$. Как видно на рис. 37, *а*, плотность плазмы возрастает до $n_e = 10^{17}$ см$^{-3}$ за первые 5 мкс (кривая *1*). Затем плотность по-



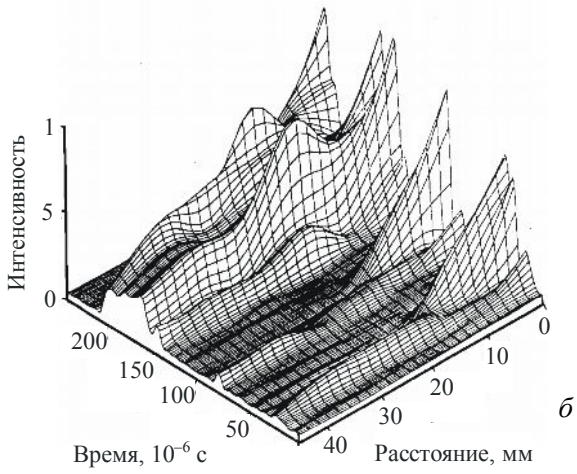




Рис. 37. Распределение плотности плазмы (*а*) и пространственно-временное распределение интенсивности излучения лития на линии LiI (*б*) около поверхности мишени

нижается и над поверхностью мишени образуется непрозрачный фронтальный слой толщиной $\delta \approx 10$—15 мм, что можно объяснить протеканием турбулентных процессов в этом слое. Подобное поведение распределения плотности (кривая *2*) наблюдалось и в течение всего процесса взаимодействия. Нейтральный литий появляется через 10 мкс после взаимодействия плазмы с мишенью на расстоянии приблизительно 10 мм от поверхности. Толщина слоя возрастает до 40—50 мм в течение 200 мкс. Таким образом, можно заключить, что над поверхностью мишеней образовывается толстый излучающий слой литиевого пара.

Эрозия лития, основным механизмом которой является капельная абляция (диаметр капель <1 мм, скорость 0,1—10 м/с), была исследована методами гравиметрии и лазерного рассеяния. Эрозия лития с поверхности КПС была в значительной степени ниже (эродированный слой 5—100 мкм за один импульс) по сравнению с эрозией свободной литиевой поверхности (уносимый слой ~1—3 мм за импульс). Ее скорость при тепловых нагрузках до 5 МДж/м$^2$ сильно зависела от размера пор КПС и ориентации поверхности относительно падающего потока плазмы (рис. 38). Средние потери массы со свободной литиевой поверхности составляли около 60 мг/см$^2$ на импульс ($R_{эф}$ = 75 мкм при 20 ºС (*а*) и 250 ºС (*б*)).

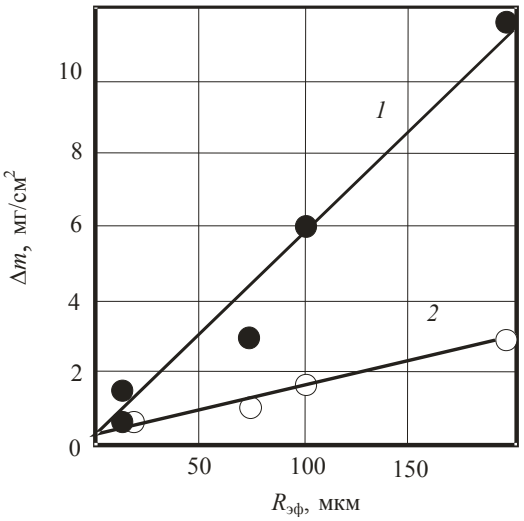



Рис. 38. Зависимость удельного уноса массы лития с поверхности КПС от эффективного радиуса пор под углами 45º (*1*) и 90º (*2*) падения потока плазмы

Сравнение экспериментальных данных с расчетными по модели абляции позволяет объяснить существующие механизмы литиевой эрозии. Для объяснения механизма эрозии КПС могут быть предложены следующие процессы. Когда размер пор превышает критическое значение (140 мкм для заданных условий эксперимента), абляция посредством «пузырькового кипения» превалирует. Это отличается от случая со свободной литиевой поверхностью, где возникновение «ветровых волн» и нестабильностей типа Кельвина — Гельмгольца играет основную роль и скорость эрозии значительно выше. Как было показано в эксперименте, капиллярные силы обеспечивают подавление абляции. Таким образом, подавление эрозии за счет капиллярных сил и образование излучающего защитного слоя могут служить объяснением высокой устойчивости литиевых КПС к воздействию импульсных тепловых нагрузок высокой удельной мощности. Кроме того, следует отметить, что в течение плазменного взаимодействия никаких изменений поверхности КПС не наблюдалось, а линии материала основы КПС в плазменном спектре отсутствовали. В этих экспериментах была отмечена следующая характерная особенность поведения КПС, представляющая интерес. Скорость эрозии лития с поверхности КПС, когда литий находился в жидком состоянии, не возрастала от импульса к импульсу, не наблюдалось и образования поверхностного рельефа. Для твердых материалов поведение является противоположным (рис. 39).

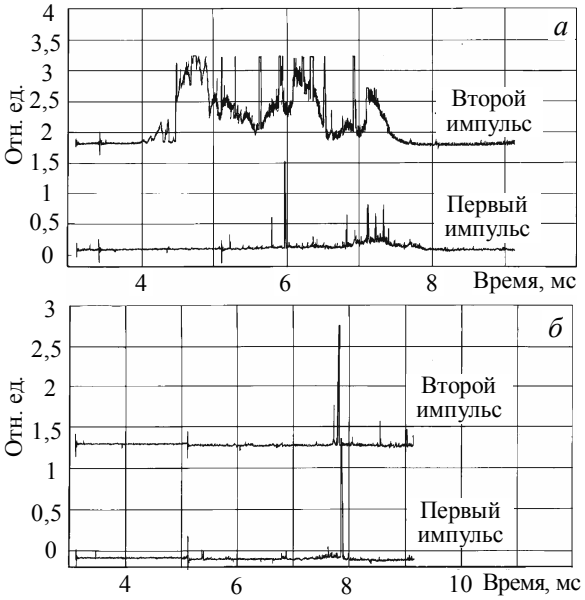


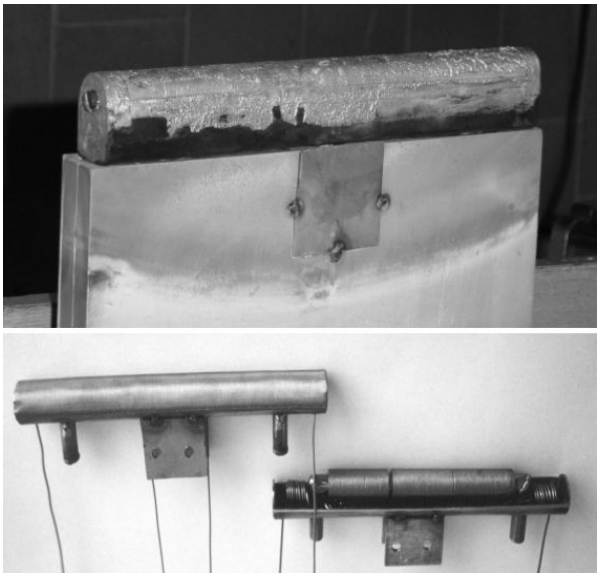

Рис. 39. Лазерная интерферограмма взаимодействия плазменного потока с поверхностью литиевой КПС: исходная температура 20 (*а*) и 250 ºС (*б*)

Исходя из рассмотрения энергетического баланса, установлено, что основная часть энергии падающего потока плазмы (~97—99%) поглощается и излучается в защитном приповерхностном слое. Это было подтверждено в экспериментах на токамаке Т-11М, где только 7% от общей энергии плазмы достигало лимитера при срыве, тогда как при нормальном разряде эта часть составляла 50—70% от общего потока на стенку [42, 45].

*Эксперименты на токамаках.* Эксперименты на токамаке Т-11М с четырьмя модификациями рельсовых лимитеров (рис. 40, 41), основанных на литиевых КПС, были проведены с целью доказать совместимость литиевой капиллярно-пористой системы с граничной плазмой [40, 46—49]. Условия экспериментов были следующие: $R/a$ = 0,7/0,2 м, $B_m$ = 1 Тл, ток плазмы $J_п \approx$ 100 кА, продолжительность импульса 0,1—0,3 с, $T_e(0)$ = 400 эВ, $n_e$ = (2—4)10$^{19}$ м$^{-3}$. Тепловая нагрузка на лимитер составляла около 10 МВт/м$^2$ при нормальном разряде и 100 МВт/м$^2$ при срыве ($\Delta t$ ~ 80 мкс). Поверхность лития, реально взаимодействующая с плазмой, равнялась около 60 см$^2$.

*а*

*б*



*а*

*б*

Рис. 40. Лимитеры токамака Т-11М на основе литиевой КПС, изготовленные из молибденовой сетки с $R_{эф}$ = 75 мкм (*а*) и стальной сетки (Х18Н10Т) с $R_{эф}$ = 15 мкм (*б*), вариант без стабилизации $T_{поверх}$

Рис. 41. Лимитеры токамака Т-11М на основе литиевой КПС, изготовленные из стальной сетки (Х18Н10Т) с $R_{эф}$ = 15 мкм, вариант со стабилизацией $T_{поверх}$ с помощью теплового аккумулятора: *а* — после испытаний; *б* — исходное состояние

Никаких катастрофических событий, приводящих к неконтролируемому поступлению лития в условиях МГД-устойчивого разряда, при температурах литиевого лимитера в интервале 20—600 ºС не наблюдалось. Общая эрозия лития с поверхности КПС была близка к уровню распыления ионами дейтерия и лития при коэффициентах распыления от 0,5 до 1. Разбрызгивание явилось основной причиной литиевой эрозии при срыве [48] для варианта лимитера, изготовленного из молибденовой сетки с $R_{эф}$ = 75 мкм и электрически соединенного со стенкой токамака. Применение КПС с $R_{эф}$ = 15 мкм и электрической изоляции лимитера от стенки камеры позволило полностью подавить это явление. Повреждения поверхности КПС после ~$2\cdot10^3$ плазменных выстрелов с 5—10% срывов не наблюдалось. Снижение теплового потока на поверхность лимитера и стабилизация его температуры в течение разряда вследствие некоронального излучения лития на периферии плазмы было установлено в экспериментах с лимитером, снабженным тепловым аккумулятором. Использование лития в экспериментах на токамаке привело к снижению рециклинга водорода. Кроме того, были определены температурные интервалы десорбции изотопов водорода (320—500 ºС) и гелия (50—100 ºС) из лития.

Следующим этапом исследований литиевых КПС в условиях плазмы токамака были эксперименты на полностью металлическом среднеразмерном токамаке FTU с сильным магнитным полем, которые были начаты в конце 2005 г. [35, 50—52]. Основными целями испытаний были исследование совместимости КПС с реальными условиями плазмы токамака, подтверждение способности литиевых КПС к самовосстановлению поверхности и удержанию лития в процессе нормального плазменного разряда и при срывах, способности выдерживать высокие тепловые нагрузки без повреждения поверхности лимитера. Литиевый лимитер был установлен в нижний вертикальный порт FTU (рис. 42) в дополнение к основному молибденовому тороидальному лимитеру, и его радиальная позиция могла изменяться от разряда к разряду в пределах от 4 см вне последней замкнутой магнитной поверхности до 2 см внутри этой поверхности. После серии экспериментов он перемещался в специальный вакуумный объем, где через окно можно было наблюдать за состоянием его поверхности.

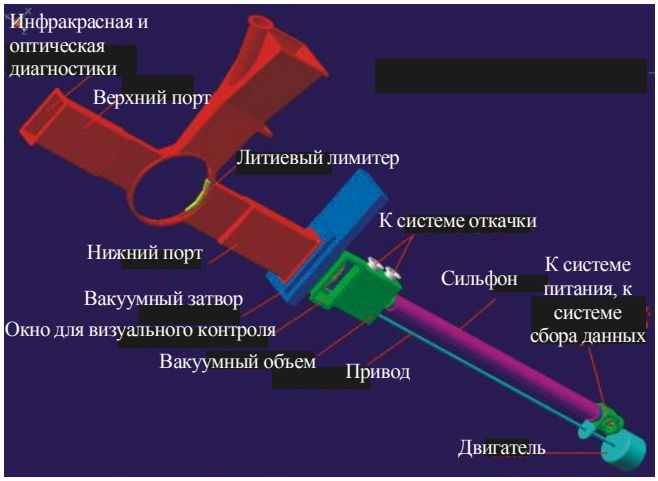
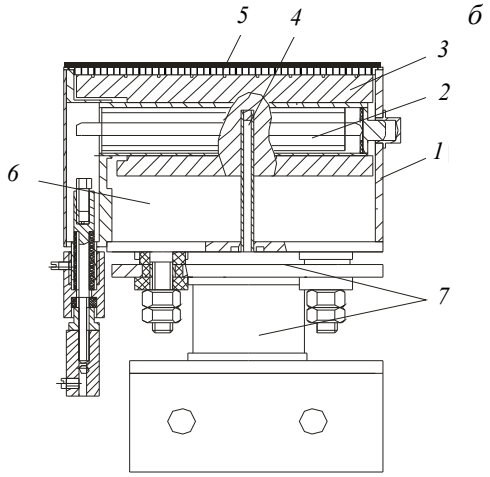



Рис. 42. Структурная схема литиевого лимитера токамака FTU

Литиевый лимитер (рис. 43) вводился в плазму в условиях омических разрядов и в разрядах с дополнительным нагревом ($B_T$ = 6 Т, $I_п$ = 0,5—0,9 МА, $n_e$ =(0,2—2,6)$10^{20}$ м$^{-3}$, τ = 1,5 с, $P$ ~ 2—5 МВт/м$^2$ при нормальном разряде). Два датчика Ленгмюра были расположены в промежутках между тремя литиевыми модулями лимитера для контроля электронной плотности и температуры в SOL. Полуцилиндрическая литиевая поверхность лимитера (общая площадь лития 170 см$^2$ и поверхность лития, реально взаимодействующая с плазмой ~50—85 см$^2$) была образована с помощью пористой системы из стальной сетки (сталь Х18Н10Т), заполненной литием и находящейся в контакте с литиевым резервуаром. Общее количество лития в лимитере составляло 80 г. Каждый модуль лимитера включал следующие конструктивные элементы (рис. 43): корпус из нержавеющей стали для сборки конструктивных элементов и подачи лития (*1*), нагреватель для начального нагрева лимитера до 550 ºС (*2*), тепловой аккумулятор из молибдена для стабилизации температуры поверхности в процессе взаимодействия с плазмой (*3*), две термопары (*4)*, КПС поверхности взаимодействия из сетчатого мата толщиной 1 мм и радиусом пор 15 мкм (*5*), питательная емкость с литием (*6*), опорная конструкция с электрической изоляцией (*7*). Три инфракрасных детектора обеспечивали контроль температуры поверхности лимитера в процессе плазменного разряда.

*а*




*б*

Рис. 43. Общий вид (*а*) и схема блока (*б*) лимитера с жидким литием токамака FTU

В течение экспериментальной кампании лимитер использовался как в качестве источника лития для кондиционирования стенок камеры токамака во время плазменного разряда, так и в качестве обращенного к плазме материала для исследования свойств КПС в условиях возрастания тепловых нагрузок до 5 МВт/м$^2$.

В экспериментах были использованы следующие два метода кондиционирования (литиизации) стенок камеры непосредственно в процессе разряда: путем физического распыления поверхности литиевой КПС, находящейся в тени основного лимитера, и путем распыления и испарения лития, полученного при временном контакте плазмы с литиевой поверхностью в начале разряда. В обоих случаях поверхность лития первоначально нагревалась до жидкого состояния (210 ºС), а затем подвергалась воздействию плазмы. Оба метода литиизации привели к снижению $Z_{эф}$, радиационных потерь и рециклинга дейтерия [51—52].

Экспериментальное исследование поведения литиевого лимитера в качестве элемента, обращенного к плазме, было успешно осуществлено (более 60 разрядов) при тепловых нагрузках, превышающих 5 МВт/м$^2$, полученных в различных режимах. Временная эволюция температуры поверхности лимитера с жидким литием, измеренная с помощью инфракрасных датчиков и рассчитанная с помощью кода ANSYS при тепловой нагрузке 2 МВт/м$^2$, представлена на рис. 44. Видно, что температура поверхности имеет тенденцию к стабилизации. Такое поведение характерно для нагрева, когда имеет место протекание процессов интенсивного рассеяния энергии. Отклонение измеренной температуры поверхности от

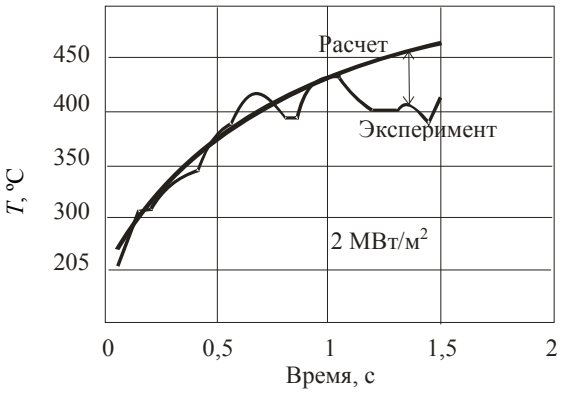



Рис. 44. Изменение температуры поверхности лимитера в процессе разряда при потоке 2 МВт/м$^2$

расчетных данных, вероятно, связано с излучением лития над поверхностью лимитера, не включенного в расчетный код. Общая мощность, выделяющаяся на лимитер, составляла 11 кВт в соответствии с расчетами по коду TECXY [51]. Это соответствует потоку энергии порядка 2,1 МВт/м$^2$, что согласуется с результатами расчета с помощью кода ANSYS. Максимальное увеличение температуры поверхности лития не превышало 250 ºС в случае более сильного взаимодействия с плазмой (>5 МВт/м$^2$) посредством смещения положения плазмы к поверхности лимитера.

Никаких аномальных явлений типа «lithium bloom» не происходило в процессе разрядов и повреждений поверхности лимитера не было обнаружено как после нормальных разрядов, так и при срыве плазмы (рис. 45). После первой экспериментальной кампании были обнаружены капли лития внутри вакуумной камеры и на поверхности лимитера (см. рис. 45). Движение капель наблюдалось только в двух направлениях относительно поверхности лимитера: радиально в сторону с высоким магнитным полем и перпендикулярно к верхнему порту. При этом они полностью отсутствуют в тороидальном направлении. Генерирование капель могло происходить при срыве плазмы вследствие воздействия сил **J**×**B** на жидкий литий или в результате механического воздействия. Ограничение неконтролируемого перемещения лимитера в окне порта посредством установки механизма ограничения колебаний лимитера позволило радикально подавить разбрызгивание лития в течение второй экспериментальной кампании. После разрядов капли отсутствовали и при срыве.

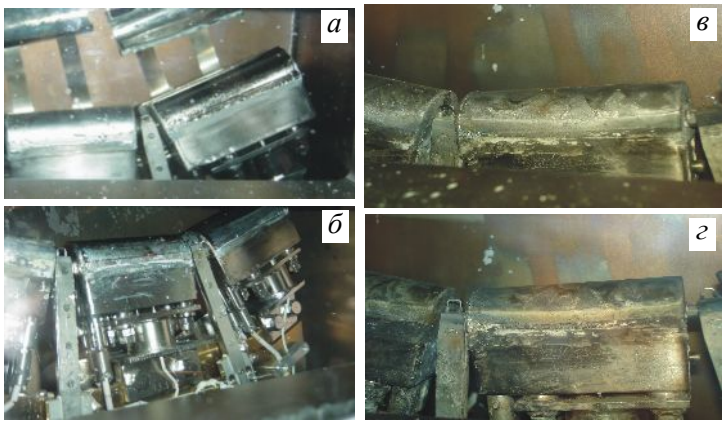
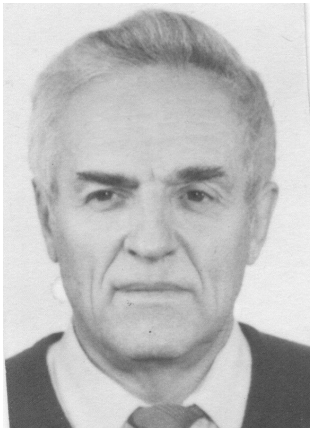


Рис. 45. Внешний вид литиевого лимитера до испытаний (*а*), после 60 омических разрядов (*б*), после 150 разрядов в режиме с дополнительным нагревом плазмы (*в*, *г*)

Исследования поведения лимитера с жидким литием в условиях токамака и его влияния на параметры плазмы должны быть продолжены в условиях активного охлаждения лимитера.

Игорь Евгеньевич Люблинский, начальник лаборатории, кандидат т.н.

Алексей Викторович Вертков, начальник группы, кандидат т.н.


Владимир Алексеевич Евтихин, начальник отдела, кандидат т.н., заслуженный конструктор РФ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Golubchikov L.G. et al**. Liquid lithium tokamak reactor. — Fusion Energy, (Proc. 16th IAEA Conf. on Fusion Energy. Montreal, 1996), 1997, vol. 3, p. 659—665.
2. **Люблинский И.Е., Евтихин В.А., Вертков А.В.** Применение жидкого лития в системах энергетического термоядерного реактора. — Перспективные материалы, 2005, № 6, с. 5—17.
3. **Nygren R.E., Rognlien T.D., Rensink M.E. et al.** A fusion reactor design with a liquid first wall and divertor. — Fus. Eng. Des. 2004, vol. 72, p. 181—221.
4. **Быстров П.И., Каган Д.Н., Кречетова Г.А., Шпильрайн Э.Э.** Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок. — М.: Наука, 1988.

5. **Гришин В.К., Глазунов М.Г., Аракелов А.Г. и др.** Свойства лития. — М.: Металлургиздат, 1963.
6. **Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н.** Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. — М.: Атомиздат, 1970.
7. **Ihle H., Wu C.** Chemical thermodynamics of fusion reactor breeding materials and their interaction with tritium. — J. Nucl. Mater., 1985, vol. 130, p. 454—464.
8. **Maroni V.A., Cairns E.J., Cafasso F.** A review of the chemical, physical and thermal properties of lithium that are related to its use in fusion reactors. Rep. ANL-8001, 1973.
9. **Грязнов Г.М., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др.** Материаловедение жидкометаллических систем термоядерных реакторов. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. **Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Мосин А.А., Тарбов А.А.** Литий. — М.: ИздАТ, 1999.
11. **Ивановский М.Н., Соркин В.П., Ягодкин И.В.** Физические основы тепловых труб. — М.: Атомиздат, 1978.
12. **Handbook** of thermodynamic and transport properties of alkali metals. Ed. by R.W. Ohse. — Oxford: Blakwell Sci. Publ., 1985.
13. **Физические** единицы. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мелихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
14. **Ивановский М.Н., Соркин В.П., Субботин В.И.** Испарение и конденсация металлов. — М.: Атомиздат, 1976.
15. **Pitts R.A., Coad J.P., Coster D.P., Federici G., Fundamenski W., Hogacek J., Krieger K., Kukushkin A., Likonen J., Matthews G.F., Rubel M., Strachan J.D. and JET-EFDA contributors.** Material erosion and migration in tokamaks. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2005, vol. 47, B303—B322.
16. **Piet S.J., Jeppson D.W., Muhlestain L.D., Kazimi M.S., Corradini M.L.** Liquid metal chemical reaction safety in fusion facilities. — Fus. Eng. and Design, 1987, vol. 5, p. 273—289.
17. **Petti D.A., McCarthy K.A., Gulden W. et al.** An overview of safety and environmental consideration in the selection of materials for fusion facilities. — J. Nucl. Mater, 1996, vol. 233—237, p. 37—43.
18. **Hubberstey P.** Dissolved nitrogen in liquid lithium — a problem in fusion reactor chemistry. — Liquid metal engineering and technology (London: BNES), 1984, vol. 2, p. 85—91.
19. **Veleskis E., Yonco R.M., Maroni V.A.** The current status of fusion reactor blanket thermodynamics. — In: Thermodynamics of nuclear materials. IAEA — SM-236/56. — Vienna: IAEA, 1979, p. 3—30.
20. **Hubberstey P., Dadd A.T., Roberts P.O.** Solubilities of nonmetals in liquid lithium — a review. — In: Material behavior and physical chemistry in liquid metal systems. — N.Y.: Plenum Press, 1982, p. 445—454.
21. **Михайлов В.Н., Евтихин В.А., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Чуманов А.Н.** Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века. — М.: Энергоатомиздат, 1999, с. 393—326.
22. **Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Pankratov V.Yu., Krasin V.P.** Numerical and experimental determination of metals and alloys solubility in liquid lithium, lithium containing nonmetallic impurities, lead and lead-lithium eutectic. — J. Nucl. Mater., 1995, vol. 224, p. 288—292.
23. **Chopra O.K., Smith D.L., Tortorelli P.P. et al.** Liquid-metal corrosion. — Fusion Technology, 1985, vol. 8, p. 1956—1969.
24. **Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Vertkov A.V. et al.** Solution of problems in material compatibility on lithium DEMO test module development for ITER. — In: Proc. of International Workshop on Tritium Management and Corrosion Activities for Liquid Breeder Blankets. ENEA. Brasimone, Italy, 27—29 September, 2004.
25. **Singh R.H.** Compatibility of ceramics with Na and Li. — J. Amer. Ceramic Soc., 1976, vol. 59, № 3—4, p. 112—115.
26. **Schreinlechner I., Holub F.** Compatibility of certain ceramics with liquid lithium. — In: Material Behavior and Physical Chemistry in Liquid Metal Systems. — N.Y.: Plenum Press, 1982, p. 105—111.
27. **Pint B.A., Moser J.L., Tortorelli P.F.** Liquid metal compatibility issues for test blanket modules. — Fus. Eng. and Design, 2006, vol. 81, p. 901—908.
28. **Smith D.L., Park J.-H., Lyublinski I.E., Evtikhin V., Perujo A., Glassbrenner H., Terai T., Zinkle S.** Progress in coating development for fusion systems. — Fus. Eng. Design, 2002, vol. 61—62, p. 629—641.
29. **Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Vertkov A.V., Ezhov N.I., Shcerbakov V.M.** Experimental study of lithium MHD flow in slotted channel from V—4Ti—4Cr alloy. — Fus. Eng. and Design, 2005, vol. 75—79, p. 1071—1074.
30. **Bamett S., Kazimi M.** Consequences of a lithium spill inside the containment and vacuum torus of a fusion reactor. Report PFC/RR-87-9. Plasma Fusion Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambrige, June 1987.
31. **Hogan J.T., Bush C.E., Skinner C.H.** Lithium effects in plasmas. — Nucl. Fusion, 1997, vol. 37, p. 705—711.
32. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Petrova N.P., Sotnikov S.M., Chernobai A.P., Khripunov B.I., Prokhorov D.Yu., Korzhavin V.M.** Lithium divertor concept and results of supporting experiments. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 2002, vol. 44, № 6, p. 955—977.
33. **Majeski R., Kaita R., Boaz M. et al.** Testing of liquid lithium limiter in CDX-U. — Fus. Eng. Des., 2004, vol. 72, p. 121—132.
34. **Vershkov V.A., Mirnov S.V., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** Experiments with lithium gettering of the T-10 tokamak chamber.— Book of Abstracts 34th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Warsaw, Poland, July 2—6, 2007.
35. **Mazzitelli G., Apicella M.L., Pericoli Ridolfini V., Alekseyev A., Apruzzese G., Bin W., Buratti P., Cesario R., Cipiccia S., Calabrò G., De Angelis R., Esposito B., Gabellieri L., Gandini F., Giovannozzi E., Gomes R., Granucci G., Kroegler H., Marinucci M., Mazzotta C., Romano A., Tudisco O. the FTU Team and ECRH Team.** Experiments on FTU with a liquid lithium limiter. — Ibid.
36. **Federici G., Andrew P., Barabaschi P., Brooks J., Doerner R., Geier A. et al.** Key ITER plasma edge and plasma-material interaction issues. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 11—22.
37. **Federici G., Zhitlukhin A., Arhipov N., Giniyatulin R., Klimov N., Landman I. et al.** Effects of ELMs and disruptions on ITER divertor armour materials. — J. Nucl. Mater., 2005, vol. 337—339, p. 684—690.
38. **Golubchikov L.G., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Pistunovich V.I., Potapov I.N., Chumanov A.N.** Development of a liquid-metal fusion reactor divertor with a capillary-pore system. — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 233—237, p. 667—672.

39. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1975.
40. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Khripunov B.I., Ezhov N.I., Sotnikov S.M.** Energy removal and MHD performance of lithium capillary-pore system for divertor target application. — Fus. Eng. Des., 2000, vol. 49—50, p. 195—200.
41. **Antonov N.V., Evtikhin V.A., Khripunov V.I., Lyublinski I.E., Petrov V.B., Shapkin V.V., Vertkov A.V.** Steady-state lithium plasma and liquid lithium divertor experimental validation. — Fusion Energy, 1996 (Proc. 16th IAEA Conf. on Fusion Energy. Montreal, 1996), vol. 3, p. 651—658.
42. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Petrova N.P., Sotnikov S.M., Chernobai A.P., Khripunov B.I., Prokhorov D.Yu., Korzhavin V.M.** Lithium divertor concept and results of supporting experiment. — In: Proc. of IAEA/TCM on Divertor Concepts, Aix en Provence. France, Sept. 11—14, 2001; Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 44, 2002, № 6, p. 955—977.
43. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Belan V.G., Konkashbaev I.K., Nikandrov L.B.** Calculation and experimental investigation of fusion reactor divertor plate and first wall protection by capillary-pore systems with lithium. — J. Nucl. Mater, 1999, vol. 271—272, p. 396—400.
44. **Ivanov L.I., Krokhin O.N., Nikulin V.Ya., Polukhin S.N., Tikhomirov A.A., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V.** Investigation of the pulse plasma stream influence on the lithium capillary-porous system, Int. — J. of Nuclear Research "Nukleonika", 2001, v. 46, S.1, S113—S115.
45. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Sotnikov S.M., Prokhorov A.S., Azizov E.A., Lazarev V.B., Safronov V.M., Kozhavin V.M.** Main direction and recent test modeling results of lithium capillary-pore systems as plasma facing components. — Plasma Science and Technology, 2004, vol. 6, p. 2291—2295.
46. **Mirnov S.V., Azizov E.A., Evtikhin V.A., Lazarev V.B., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Prokhorov D.Yu.** Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and applications of the lithium capillary-pore system in future fusion reactor devices. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 2006, vol. 48, № 6, p. 821—837.
47. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Azizov E.A., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Sotnikov S.M.** Experimental study on tokamak plasma interaction with lithium capillary-pore systems. — In: Fusion Energy 2000. 18th Conf. Proc. Sorrento, Italy, 4—10 Oct. 2000. IAEA-CSP-8/C, an IAEA CD-ROM, EXP4/21, IAEA, 2001.
48. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Sotnikov S.M.** Test of lithium capillary-pore systems on the T-11M tokamak. — Fusion Energy 2002. 19th Conf. Proc. Lyon, France, 14—19 Oct. 2002. IAEA-CPS-19/CD, FT/P1-17, IAEA, 2003.
49. **Mirnov S.V., Azizov E.A., Lazarev V.B., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V.** Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and perspectives of the lithium capillary-pore system application in fusion. — In: Fusion Energy 2004. 20th IAEA Conf. Proc. Vilamura, Portugal, 1—6 November, 2004. IAEA-CPS-20/CD, EX/P5-25, IAEA, 2005.
50. **Apicella M.L., Mazzitelli G., Lazarev V.B., Azizov E.A., Mirnov S.V., Petrov V.G., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** Preliminary analysis on a liquid lithium limiter in capillary porous system (CPS) configuration in view of a "litization" experiment on FTU tokamak. — Fusion Eng. and Design, 2005, vol. 75—79 p. 351—355.
51. **Mazzitelli G., Apicella M.L., Pericoli V., Marinucci M., Mazzotta C., Tudisco O., Lazarev V., Alekseyev A., Vertkov A., Zagórski R.** FTU experimental results using a lithium liquid limiter. — In: 48th APS. Philadelfia, 11 Feb. 2006. N UI1.00005 (to be published).
52. **Apicella M.L., Mazzitelli G., Pericoli V., Lazarev V., Alekseyev A., Vertkov A., Zagorski R.** First experiments with lithium limiter on FTU. — In: 17th PSI Conf. Hefei, China, 22—26 May 2006 (to be published).

Статья поступила в редакцию 15 октября 2007 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 4, с. 13—44.

**УДК 621.039**

# О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ МИКРОТЕЧЕЙ ВОДЫ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

*А.Б. Антипенков (Институт технической физики, Карлсруэ), О.Н. Афонин, В.Н. Колесников (Физический институт РАН), И.В. Визгалов, В.А. Курнаев (Московский инженерно-физический институт)*

В статье обсуждается вариант спектроскопического метода обнаружения «скрытых» микротечей воды в камере токамака ИТЭР. Приведены результаты экспериментов на установке ПР-2 в МИФИ, подтверждающие высокую обнаружительную способность $\dot{n} \leq 10^{10}$ с$^{-1}$ спектроскопического метода диагностики микротечей воды в вакуумной камере по свечению (0—0) полосы радикала $OH^*$. Эксперименты проводились в трех буферных газах (Ar, $D_2$, воздух) при давлении ~$10^{-2}$ Па.