

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 523.7: 629.78

С. Е. Беловолов, В. К. Гришин,  
К. Е. Демихов, Н. К. Никулин

## **ПРОНИЦАЕМОСТЬ КИСЛОРОДА В ВЫСОКО- ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЛИТIEВЫХ СИСТЕМАХ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

*Рассмотрено влияние космической среды на свойства тугоплавких металлов, а также процессы и условия взаимодействия кислорода с элементами высокотемпературной энергоустановки. Приведены расчетные и экспериментальные данные проницаемости кислорода через ниобиевые сплавы.*

**Высокотемпературные литиевые системы в космической энергетике.** Явления проницаемости кислорода сквозь оболочку литиевого контура из ниобия и накопления кислорода в литиевом теплоносителе были открыты в 1975 г. при испытаниях первой полномасштабной теплогидравлической литиевой модели космической энергетической установки, созданной в 1969–1970 гг. РКК “Энергия” совместно с институтом электросварки им. Е.О. Патона АН УССР и Днепровским технологическим институтом. В состав литиевой модели космической установки входил большой литиевый контур из ниобия и тепловысоковакуумная установка с вакуумной камерой объемом 20 м<sup>3</sup>. Дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования проницаемости атомарного кислорода сквозь тугоплавкие металлы в космических условиях, получение термодинамических зависимостей, расчеты основных показателей проницаемости кислорода по ряду причин были закончены только в 1998 . . . 2000 гг.

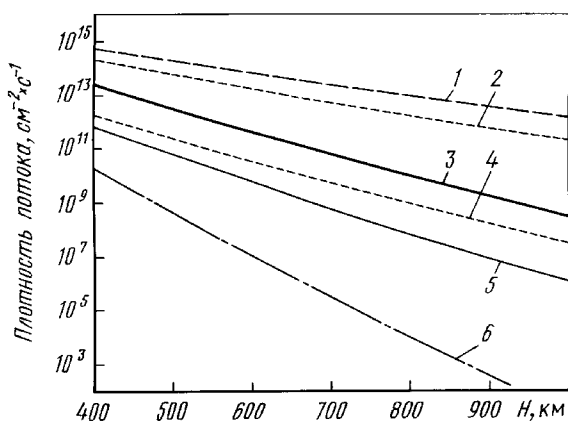
Космическая энергетическая установка большой мощности с оптимальным термодинамическим циклом [1], фактически состоит из двух основных частей: ядерно-энергетической (ядерный реактор на быстрых нейтронах, преобразователь ядерно-тепловой энергии в электрическую, тенева биологическая защита) и теплотранспортной (циркуляционный контур или система контуров с литиевым теплоносителем и электромагнитным насосом, излучатель на основе тепловых труб с натриевым теплоносителем). Обе системы функционально автономны, хотя схематически и конструктивно тесно связаны между собой в активной зоне ядерного реактора.

В целом литиевая система представляет собой совокупность цельносварных пространственно сложных трубчатых конструкций — модулей, размещенных совместно с ядерно-энергетической системой на достаточно жестком оптически прозрачном каркасе. Теплоизлучающая поверхность натриевых тепловых труб — это слоеная МОП-структура ( $\text{Me-SiO}_2\text{-NiCr}_2\text{O}_3$ ), наносимая на ниобиевый корпус тепловой трубы и обеспечивающая интегральную степень черноты поверхности  $\varepsilon = 0,9 \dots 0,91$ .

Относительно малый КПД системы преобразования и необходимость сброса непреобразованной теплоты в космическую среду требуют большой поверхности теплоотвода излучателя. Суммарная наружная теплотранспортная поверхность литиевых модулей энергоустановки мощностью 500 кВт составляет  $35 \dots 40 \text{ м}^2$ , суммарная наружная поверхность излучателя —  $400 \dots 450 \text{ м}^2$ ; толщина стенок трубопроводов 0,5 мм.

Но именно эти теплоподводящие и теплоизлучающие поверхности, работающие при температурах  $900 \dots 1300 \text{ К}$  в течение  $30\,000 \dots 40\,000 \text{ ч}$ , воспринимают непрерывное коллективное воздействие факторов космической среды и, прежде всего, орбитальных атомарных газов (кислорода, азота). Эта уязвимость литиевой системы уже при проектировании требует специальных мер по обеспечению ее живучести и стойкости в космических условиях.

**Атомарные газы на поверхности высокотемпературной литиевой системы в космической среде (КС).** Наибольший интерес по воздействию на поверхность литиевой системы представляет атомарная составляющая КС. На рис. 1 показана инженерная модель кисло-



**Рис. 1.** Средние значения плотности потоков атомарного (1, 2, 3) и молекулярного (4, 5, 6) кислорода для уровней солнечной активности  $F_{10.7} = 70, 210$  и  $350$  соответственно

родной составляющей КС на поверхности космического аппарата (КА) в виде совокупности высотных профилей потоков быстрого (с учетом движения КА) атомарного кислорода и быстрого молекулярного кислорода для орбит 400 . . . 800 км и индекса солнечной активности  $F_{10.7} = 70, 210, 350$  по данным работы [2].

Непосредственно с поверхностью нейтральные частицы взаимодействуют в атомарной форме. Атомы на поверхности появляются в результате: соударения с поверхностью быстрых фотодиссоциированных атомов космической среды (см. рис. 1) и перехода быстрых атомов в тепловые возбужденные; поверхностной диссоциации при торможении быстрых молекул (поверхностная фотодиссоциация); разрыва химической связи атомов в молекуле в процессе превращения кинетической энергии молекул при взаимодействии с поверхностью; сорбционно-каталитической диссоциации быстрых молекул при их адсорбции на активных центрах.

Схемы поверхностной диссоциации приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Диссоциация быстрого молекулярного кислорода  $O_2^*$  на поверхности космического аппарата**

ПКД	$O_2^* + \Pi + E_{кин}(O_2^*) - E_{дис}(O_2) \rightarrow O_{зап} + O_{зап} + Q'_{тепл}$
КУФ-диссоциация	$O_2^* + \Pi + h\nu - E_{дис}(O_2) \rightarrow O_{зап} + O_{зап} + Q''_{тепл}$

**П р и м е ч а н и я.** ПКД — поверхностная кинетическая (ударная) диссоциация, КУФ — диссоциация коротковолновым ультрафиолетовым фотоном;  $E_{кин}$  — кинетическая энергия направленного движения  $O_2^*$ ;  $E_{дис}$  — энергия диссоциации  $O_2$ ;  $h\nu$  — энергия КУФ;  $O_{зап}$  — запасенная энергия диссоциированного атома кислорода;  $Q'_{тепл} = E_{кин} - 2E_{зап}$ ;  $Q''_{тепл} = h\nu - 2E_{зап}$ ;  $E_{кин}(O_2^*) = 10,1$  эВ;  $E_{дис}(O_2) = 5,1$  эВ.

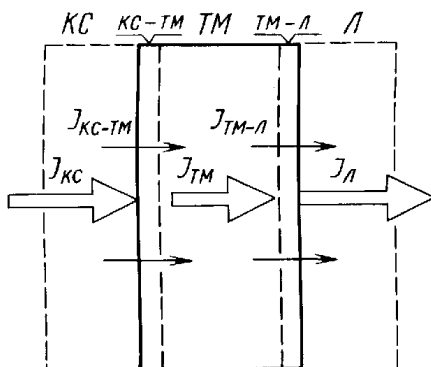
Атомарные частицы обладают четырьмя характерными энергетическими признаками, определяющими их активное участие в процессах космической коррозии: высокой газокинетической температурой (1000 . . . 2500 К), создаваемой термосферой; высоким химическим и кинетическим потенциалом (приобретенная в результате движения КА кинетическая энергия); высоким термодинамическим потенциалом (возбужденное состояние атомов/молекул). Плотность образовавшейся атомарной среды может быть довольно высокой, особенно в период максимальной солнечной активности. Основной компонент атомарной среды — это кислород.

**Атомарные газы на поверхности литиевых систем в высоковакуумной среде.** В лабораторных условиях при высоком вакууме на поверхность воздействуют только двухатомные молекулы хими-

чески активных газов (кислород, азот и водород). При высокотемпературной адсорбции молекул поверхностью происходит сорбционно-каталитическая диссоциация молекул на активных центрах (диссоциативная хемосорбция). При адсорбции молекул двухатомного кислорода поверхностью изменяется состояние молекулы, уменьшается прочность химической связи атомов в молекуле. Адсорбция молекул сопровождается деформацией, происходит разрушение адсорбированной молекулы. При низких температурах вероятность сорбционно-каталитической диссоциации (СКД) газовых молекул очень мала или даже просто нулевая. При увеличении температуры вероятность СКД экспоненциально растет, степень поглощения возрастает, начинаются растворение атомарного газа в приповерхностном слое, диффузия вглубь металла и образование химических соединений в растворах. Для дальнейшего взаимодействия необходима СКД. Воздействие возникающих атомарных газов и моделирует воздействие орбитальной среды.

**Массоперенос в высокотемпературной системе “тугоплавкий металл–литий”.** Высокотемпературная литиевая система, основой которой является литиевый трубопровод, представляет собой сложную многофазную систему в различных агрегатных состояниях (рис. 2). Воздействие космической среды, в первую очередь атомарных газов (кислорода, азота и водорода), на поверхность литиевой системы приводит к возникновению комплекса фазово-граничных и диффузионных процессов массопереноса в соответствии с изменением его химического потенциала в направлении переноса. Применительно к литиевой системе, на поверхность которой в космической среде воздействует орбитальный атомарный кислород (или азот), это означает, что кислород (азот) будет переходить из раствора с металлом, где его химический потенциал больше, в тот металл, где его химический потенциал меньше. Соотношение химических потенциалов  $\mu$  атомарного газа

Рис. 2. Функциональная схема массопереноса в литий-ниобиевом трубопроводе. Фазы системы: КС — космическая среда, ТМ — тугоплавкий металл, Л — литий, КС-ТМ и ТМ-Л — соответствующие пограничные слои. Потоки:  $J_{КС-КС}$  — поверхность трубопровода,  $J_{КС-ТМ}$  — через пограничный слой в ТМ,  $J_{ТМ}$  — в субструктуре металла,  $J_{ТМ-Л}$  — через пограничный слой в литий,  $J_{Л}$  — в литиевом теплоносителе



между фазами литиевой системы позволяет определить направления самопроизвольного газового потока:  $\mu_{\text{КС}} > \mu_{\text{ТМ}} > \mu_{\text{ЛТ}}$  — поток кислорода из космической среды (КС) в литиевый теплоноситель (ЛТ);  $\mu_{\text{КС}} > \mu_{\text{ТМ}} < \mu_{\text{ЛТ}}$  — поток азота из космической среды и литиевого теплоносителя в тугоплавкий металл (ТМ).

Аналитические зависимости для расчета химических потенциалов кислорода в зависимости от температуры и концентрации его в растворах в ниобии и литии приведены в табл. 2 [3]. На рис. 3 показаны результаты расчета температурных изменений и изоконцентратов химических потенциалов кислорода для его растворов в ниобии и литии.

Таблица 2

**Предельная растворимость и химический потенциал кислорода в растворах лития и ниобия**

Обозначение	Размерность	Литий	Ниобий
$c_{\text{max}}$	% ат.	$\lg(c_{\text{max}}) = 2,5 - 2500T^{-1}$	$\lg(c_{\text{max}}) = 1,66 - 1680T^{-1}$
$\mu^0(T)$	кал/моль	$\mu^0(T) = -288600 + 68,84T$	$\mu^0(T) = -192240 + 36,24T$
$\mu^0(c, T)$	кал/моль	$\mu^0(c, T) = 9,15T \lg(c) + 36,69T - 263500$	$\mu^0(c, T) = 9,15T \lg(c) + 21,05T - 176870$

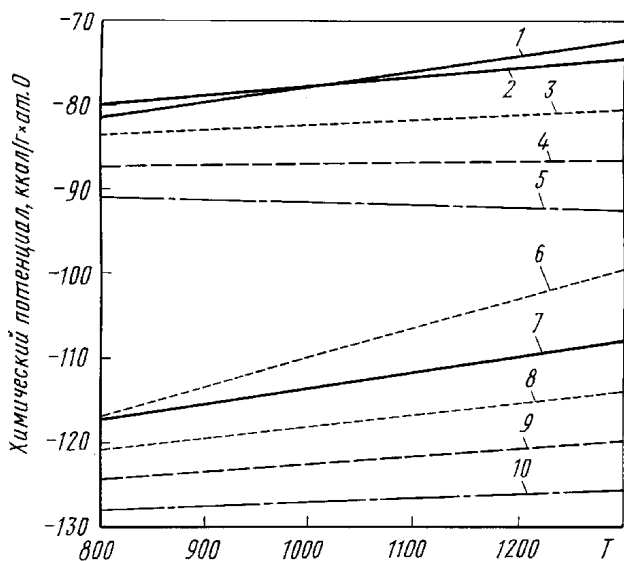
**П р и м е ч а н и е.**  $c_{\text{max}}$  — предельная растворимость кислорода в литии и ниобии;  $\mu^0(T)$  — химический потенциал кислорода в равновесной системе “Me–MeO”;  $\mu^0(c, T)$  — химический потенциал кислорода в растворах постоянного состава;  $c$  — концентрация кислорода;  $T$  — температура

Из рис. 3 следует, что в системе “КС–ТМ–ЛТ” при высоких температурах происходит самопроизвольный перенос кислорода между элементами системы:

- безактивационная адсорбция — растворение кислорода в поверхностном слое тугоплавкого металла (ниобия);
- диффузионный перенос растворенного газа в поле химического потенциала от поверхности сорбции к противоположной стороне обложки (ниобия) без потери кислорода по пути диффузии;
- перераспределение (десорбция) газа из твердой фазы в жидкий металл (литий);
- растворение — проницаемость — накопление газа в форме химических соединений в литиевом теплоносителе.

Каждый из этих этапов представляет физико-химический процесс из ряда стадий, связанных с межфазным переходом.

**Проницаемость атомарного кислорода сквозь тугоплавкие металлы.** Перечисленные стадии массопереноса между элементами ли-



**Рис. 3. Изоконцентраты химического потенциала атомарного кислорода в равновесной системе  $Me-MeO$  в зависимости от температуры:**

1 — Nb-NbO; 2 — Nb-1 % ат. O; 3 — Nb- $10^{-1}$  % ат. O; 4 — Nb- $10^{-2}$  % ат. O; 5 — Nb- $10^{-3}$  % ат. O; 6 — Li-Li<sub>2</sub>O; 7 — Li-1 % ат. O; 8 — Li- $10^{-1}$  % ат. O; 9 — Li- $10^{-2}$  % ат. O; 10 — Li- $10^{-3}$  % ат. O

тивной системы, прежде всего, связаны с процессом проницаемости атомарного газа сквозь металл в поле химического потенциала. Газопроницаемость — это свойство металла, определяемое его структурой, составом, параметрами кристаллической решетки, размерным фактором, электронным взаимодействием между металлом и атомарным газом, химическим сродством металла и атомарного газа и температурой. При повышении температуры проницаемость металла возрастает и становится особенно заметной при рабочих температурах 900...1300 К. Просто устранить проницаемость невозможно, требуется привлекать внешние физико-химические материаловедческие меры воздействия. Именно поэтому газопроницаемость — неизбежная плата за применение высокотемпературных технологий.

Использование для обеспечения теплоотвода в энергоустановке двух контактирующих металлов, у одного из которых (ниобия или его сплава) химический потенциал кислорода в растворе выше, чем у другого (лития), неизбежно влечет за собой появление газопроницаемости, возникновение постоянного диффузионного потока, особенно при наличии непрерывного подвода газа из внешней космической среды. Неизбежно загрязнение жидкого металла атомарным газом — космическая коррозия жидкого металла, ухудшение его теплофизических свойств во времени [4].

Процессы газопроницаемости будут возникать в жидкометаллических системах не только на низких (400... 450 км) и даже на высоких (800... 1000 км) околоземных орбитах (атомарный кислород), но и на геостационарных орбитах (орбитальный водород, захваченные протоны) и даже на околомарсианских орбитах (атомарный кислород). По отдельности процессы растворимости, диффузии, проницаемости невозможны. Критерием количественной оценки газопроницаемости служит коэффициент проницаемости, т.е. плотность диффузионного потока:

$$\Pi = CD/\delta,$$

где  $\Pi$  — коэффициент проницаемости, г/см<sup>2</sup>·с;  $C$  — коэффициент растворимости, г/см<sup>3</sup>;  $D$  — коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с;  $\delta$  — толщина стенки, см.

Как правило, в расчетах принимают максимальную растворимость (концентрацию) при данной температуре  $C = C_{\max}$ . Коэффициент проницаемости  $\Pi = C_{\max}D/\delta$  это, по сути, максимально возможный при данной температуре и толщине стенки диффузионный поток растворенных в металле атомов газа. При более высоких диффузионных потоках концентрация атомов кислорода в поверхностном слое ниобия превысит равновесное для данной температуры значение  $C_{\max}$ , и начнется выделение фазы NbO — окисление поверхности.

В работе [5] приведены аналитические температурные зависимости  $C_{\max}(T)$  и  $D(T)$  практически для всех металлов периодической системы. Для тугоплавких металлов эти зависимости даны в табл. 3 и 4, (зависимости для лития — по данным работы [6]). Результаты расчета растворимости, диффузии и проницаемости в диапазоне температур 600... 1200°С приведены соответственно на рис. 4–6.

Таблица 3

**Аналитические соотношения для расчета высокотемпературной газопроницаемости тугоплавких металлов**

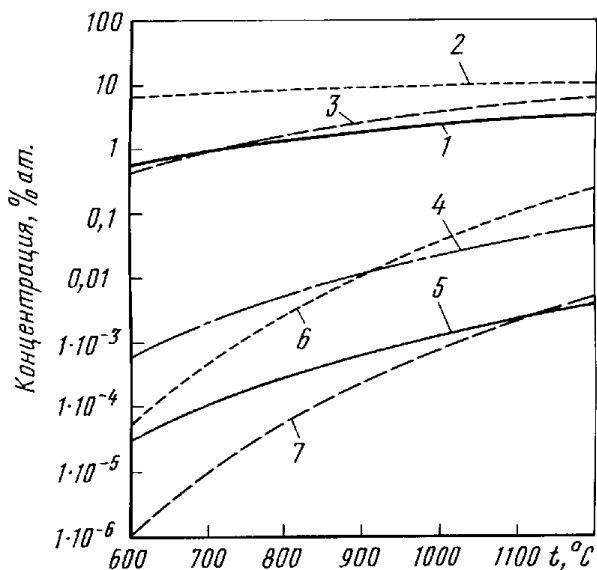
Наименование	Обозначение	Размерность	Активационные уравнения	Расчетные уравнения
Растворимость	$c_{\max}$	% ат.	$c_{\max} = c_0 \exp(-H_{\text{ар}}R^{-1}T^{-1})$	$\lg(c_{\max}) = A - BT^{-1}$
Диффузия	$D$	см <sup>2</sup> /с	$D = D_0 \exp(-H_{\text{ад}}R^{-1}T^{-1})$	$D = D_0 \exp(-FR^{-1}T^{-1})$
Проницаемость	$\Pi$	г/см <sup>2</sup> ·с	$\Pi = \Pi_0 \exp(-H_{\text{ап}}R^{-1}T^{-1})$ $H_{\text{ап}} = H_{\text{дис}} + H_{\text{ар}} + H_{\text{ад}}$	$\Pi = c_{\max}D$

Примечание.  $c_0$ ,  $D_0$ ,  $\Pi_0$  — соответственно коэффициенты растворимости, диффузии и проницаемости;  $H_{\text{ар}}$ ,  $H_{\text{ад}}$ ,  $H_{\text{ап}}$ ,  $H_{\text{дис}}$  — соответственно теплота активации растворимости, диффузии, проницаемости, диссоциации;  $R$  — газовая постоянная,  $T$  — температура

**Термодинамические коэффициенты уравнений для расчета  
высокотемпературной проницаемости тугоплавких металлов**

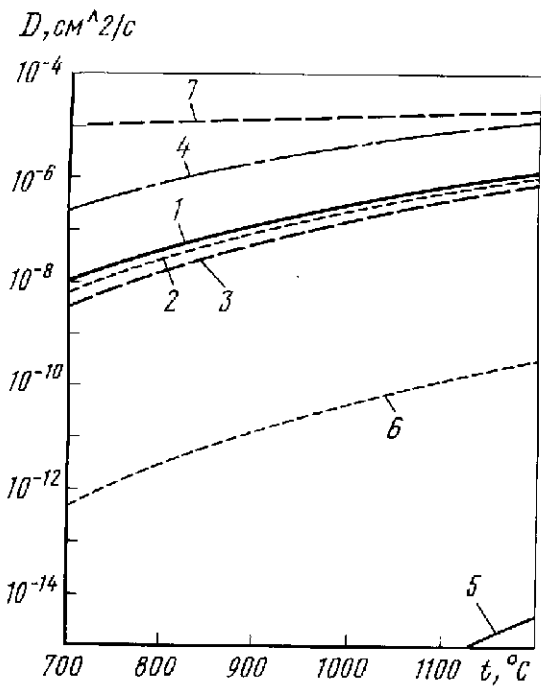
Газ	Металл	Коэффициенты			
		<i>A</i>	<i>B</i>	$D_0$	<i>F</i>
Атомарный кислород	Ниобий	1,67	1680	$5 \cdot 10^{-2}$	27600
	Ванадий	1,35	482	$2,46 \cdot 10^{-2}$	29500
	Молибден	1,67	4870	$3,0 \cdot 10^{-2}$	31000
	Железо	2,18	6700	$3,7 \cdot 10^{-2}$	23300
	Никель	4,62	7750	$1,82 \cdot 10^{-2}$	72000
	Хром	3,09	7900	$1,04 \cdot 10^{-2}$	37000
	Литий	2,50	2500	$6,6 \cdot 10^{-2}$	3860

Из графиков следует, что газопроницаемость при высоких температурах свойственна всем тугоплавким металлам. Наибольшая проницаемость при рабочих температурах 800...1300 К у тех тугоплавких металлов, которые обладают наибольшей растворимостью кислорода, например у ниобия и ванадия. Уровень газопроницаемости атомарного кислорода для ниобия и ванадия при температуре 700...1000 °С составляет  $1 \cdot 10^{-9}$  ...  $1 \cdot 10^{-7}$  г/см<sup>2</sup>·с, при толщине стенки 1 мм.



**Рис. 4.** Предельная растворимость кислорода в ниобии, ванадии, хrome, молибдене, железе, никеле и литии (1...7) соответственно в зависимости от температуры



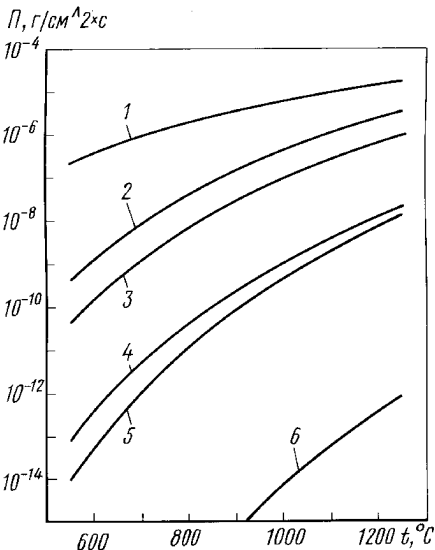


**Рис. 5.** Коэффициент диффузии кислорода в тугоплавких металлах (ниобии, хrome, молибдене, железе, никеле, ванадии) и литии (1...7 соответственно) при различных температурах

Проницаемость — это накопление кислорода в литий-ниобиевом трубопроводе. В результате проницаемости оболочки литиевого трубо-

провода газовый диффузионный поток доходит до внутренней стенки трубопровода и десорбируется в литиевый теплоноситель. Скорость десорбции обеспечивается непрерывностью диффузионного потока и определяется соотношениями химических потенциалов и коэффициента проводимости газ—металл.

Сравнительные результаты проницаемости атомарного кислорода через ниобий и литий приведены на рис. 6. Из графика следует, что определяемая проницаемостью поглощательная способность по кислороду для лития существенно больше, чем для ниобия, и сколько бы кислорода не пропускал ниобий, весь кислород будет накапли-



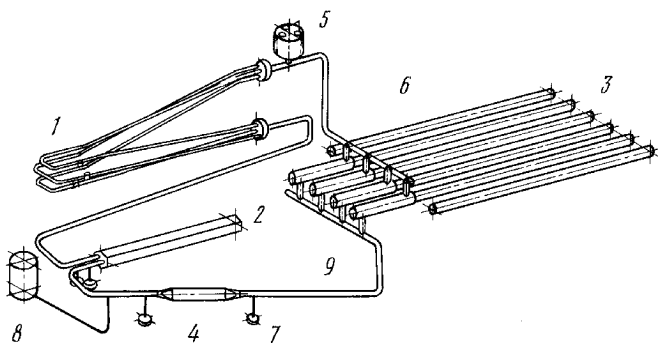
**Рис. 6.** Проницаемость кислородом тугоплавких металлов (ниобия, ванадия, хrome, молибдена, железа и лития — 1...6 соответственно) при различных температурах

ваться в литии. Обратный процесс, с учетом малых начальных концентраций кислорода в ниобии при любых концентрациях кислорода в литии, термодинамически запрещен (см. рис. 3).

Экспериментальное исследование проницаемости атомарного кислорода через оболочку литиевого трубопровода и его накопление в литиевом теплоносителе проводили при испытаниях большого литиевого контура — полномасштабной теплогидравлической литиевой модели космической ядерной энергоустановки (ЯЭУ) 11Б97 из ниобиевого сплава НЦУ, конструктивная схема которой с габаритными размерами — длиной 3800 мм, в миделе — 1900 мм — показана на рис. 7. Литий-ниобиевая модель энергетической установки была помещена в термо-высоковакуумную камеру ( $p_{O_2} \leq 5 \cdot 10^{-7}$  мм.рт.ст.) объемом  $\sim 20$  м<sup>3</sup>.

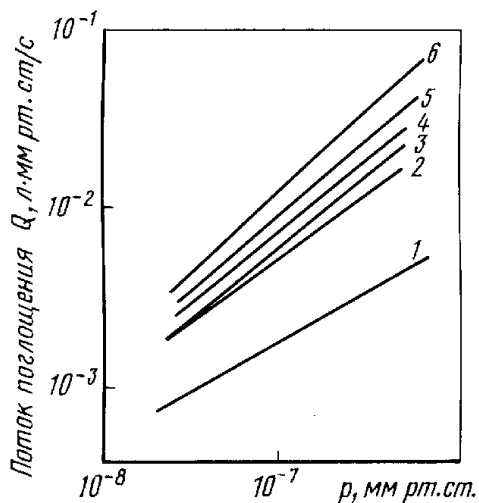
В вакуумную камеру при действующей системе откачки через натекаТЕЛЬ подавался постоянный поток молекулярного кислорода из газовой системы. Величину потока выбирали такой, чтобы проницаемость преобразованного атомарного кислорода соответствовала плотности набегающего потока орбитального атомарного кислорода на орбите 400 км, определяемой при максимуме индекса солнечной активности  $F_{10.7} = 320 \dots 350$ .

На поверхности литий-ниобиевого контура при рабочей температуре 900...1300 К происходит СКД-диссоциация молекулярного кислорода, возникает диффузионный поток проницаемости атомарного кислорода через стенку трубопровода в литиевый теплоноситель, поглощение и накопление теплоносителем атомарного кислорода.



**Рис. 7. Общий вид теплотехнического макета модуля полномасштабной литиевой модели космической ЯЭУ большой мощности из ниобия (сплав НЦУ):**

1 — высокотемпературный литиевый нагреватель — тепловой имитатор электрогенерирующего пакета; 2 — корпус электрогенерирующего пакета; 3 — секция излучателя из четырех тепловых труб с натриевым теплоносителем; 4 — канал электромагнитного насоса; 5 — расширительный бак; 6 — тепловой имитатор тепловой трубы; 7 — датчик давления; 8 — бак заполнения—слива; 9 — трубопровод



**Рис. 8. Высокотемпературный литий-ниобиевый контур как вакуумный насос:**

1 — производительность откачки вакуумной системой  $Q_{BC}$  при нормальной температуре; 2, ..., 6 — откачные характеристики системы  $Q_{\Sigma}$  при включении в работу контура при температурах 900, 1000, 1100, 1200 и 1300 К соответственно

и повышается во времени в сплаве НЦУ (Nb–1 % Zr–0,1 % С) в результате выгорания циркония.

На рис. 8 показаны полученные экспериментально зависимости производительности откачки контура от температуры. По известной площади поверхности контура можно определить его проницаемость. Полученные значения составляют  $6 \cdot 10^{-11}$ ,  $2 \cdot 10^{-10}$ ,  $3 \cdot 10^{-10}$ ,  $8 \cdot 10^{-10}$ ,  $2 \cdot 10^{-9}$  г/см<sup>2</sup>·с для температур 600, 700, 800, 900 и 1000 °С соответственно. Из сравнения расчетного значения коэффициента проницаемости  $\Pi(1000^\circ) = C_{\max}D/\delta = 1 \cdot 10^{-7}$  и экспериментальной плотности диффузионного потока кислорода в контур  $2 \cdot 10^{-9}$  (1000 °С) следует, что процессы окисления ниобия возможны при гораздо более высоких давлениях кислорода. Как было указано ранее, в эксперименте моделировали наиболее жесткие орбитальные условия для космической энергоустановки. Следовательно, основной механизм коррозионных процессов в системе [кислород–ниобий–литий] — это окисление (коррозия) литиевого теплоносителя как следствие высокотемпературной газопроницаемости ниобия. Подчеркнем еще раз, что газопроницаемость — это общее свойство всех тугоплавких металлов при высоких температурах.

Проводили оценку поглощения двух потоков: молекулярного кислорода откачной системой камеры и атомарного СКД-кислорода высокотемпературным литий-ниобиевым контуром. Проницаемость атомарного кислорода через стенку определяли по зависимости

$$P_{ст} = Q_{\Sigma}(T) - Q_{BC},$$

где  $Q_{\Sigma}(T)$  — измеряемая производительность вакуумной системы совместно с “горячим” контуром,  $Q_{BC}$  — производительность откачной системы при комнатной температуре.

Установлено, что начальное содержание кислорода в материале трубопровода, составляющее  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  % ат, практически не изменяется в чистом ниобии и

**Выводы.** Таким образом, литий-ниобиевый контур на самом деле выполняет две функции: отводит непреобразованную в ЯЭУ теплоту и накачивает через оболочку газы внешней среды в объем теплоносителя. Причем откачные характеристики контура за счет проницаемости (120...150 тыс. л/с) существенно превышают откачные характеристики вакуумной системы (30...40 тыс. л/с) при давлении  $p_{O_2} \leq 10^{-7}$  мм.рт.ст. Собственно, именно литий-ниобиевый контур позволил получить идеальные вакуумные условия при длительных испытаниях больших литий-ниобиевых контуров на стенде ЭУ-305 за период 1975...1995 гг.

Влияние друг на друга процессов теплопереноса во внешнюю вакуумную среду и массопереноса из вакуумной среды в контур вследствие газопроницаемости практически не исследовали.

Использование тугоплавких металлов и, прежде всего, ниобия и ванадия как конструкционных материалов космических ЯЭУ, легко пропускающих орбитальный атомарный кислород при рабочих температурах, без специальных защитных покрытий — нецелесообразно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор работ РКК “Энергия” имени С.П. Королева по термоэмиссионным ядерным энергетическим установкам большой мощности космического назначения / Ю.И. Сухов, В.В. Сиявский и др. // РКТ. Тр. Сер. “Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем”. – РКК “Энергия”. – 1995. – Вып. 3–4.
2. Гришин В. К. Космическое пространство на низких околоземных орбитах как рабочая среда космических ядерных энергетических установок // РКТ. Тр. Сер. “Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем”. – РКК “Энергия”. – 1996. – Вып. 2–3.
3. Исследование воздействия атомарного кислорода на конструкционные и твердоэлектrolитные материалы при высоких температурах / А.А. Вечер, А.Г. Воропаев, В.К. Гришин и др. // НТО, БГУ–НПО “Энергия”. – 1990.
4. Андреев П. А., Федорович Е. Д., Калачев Ф. Ф. Исследование влияния примесей на теплопередающие свойства жидких металлов // НТО. – ЦКТИ. – 1962.
5. Фромм Е., Гебхарт Е. Газы и углерод в металлах. – М: Металлургия, 1980.
6. Исследование процессов поглощения и проницаемости газов в термосорбционных системах с жидкометаллическими накопителями при высоких температурах / В.К. Гришин, В.Ф. Шатинский, Р.Н. Гарлинский и др. // НТО. ФМИ–НПО “Энергия”, инв. № 126/43.88, 1988.
7. Аракелов А. Г. Природа и механизм взаимодействия переходных и щелочных металлов // Тез. докл. конф. “Ядерная энергетика в космосе”. – Ч. 1. – С. 154. – Обнинск, 1990.



Константин Евгеньевич Демихов — д-р техн. наук, Первый проректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области вакуумной технологии.

K.Ye. Demikhov — D. Sc. (Eng.), 1st pro-rector, head of the “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 publications in the field of vacuum technology



Николай Константинович Никулин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области вакуумной техники.

N.K. Nikulin — Ph.D, assistant professor of the “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of vacuum technology.

---

## ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МГТУ имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях. Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 10 номеров в год.

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

К публикации в журнале “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана” принимаются статьи, подготовленные в учебных, научных и промышленных организациях.

### Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	150	300
72783	“Приборостроение”	2	150	300
79982	“Естественные науки”	1	—	150