
II. Доповіді учасників П'ятої міжнародної конференції

УДК 629.76/78; 629.78; 629.76

А.Г. Косторнов, В.В. Скороход, В.П. Солнцев, Г.А.Фролов
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ

Представлено результати розробки технологій отримання нових матеріалів та конструктивних рішень з метою забезпечення теплового режиму роботи космічних апаратів. Серед них — теплові труби з використанням різних капілярних структур, створення багаторазового теплового захисту з використанням металів, реалізація процесу абляції.

Ключові слова: тепловий режим, космічні апарати, теплові труби, капілярні структури, металевий тепловий захист, абляція.

Введение

Обеспечение тепловых режимов космических аппаратов (КА) при выведении, на орбите и при входе в плотные слои атмосферы является одной из важнейших задач при проектировании ракетно-космической техники. Незначительные отклонения теплового состояния конструкции КА от заданных условий могут привести к ее перегреву или переохлаждению при длительной эксплуатации на орбите, а недостаточная тепловая защита при спуске в плотных слоях атмосферы вообще может уничтожить КА. Диапазон температур, при которых находятся отдельные конструкции КА при эксплуатации на орбите и спуске в атмосфере, может изменяться от минус 100 °С до 3000 °С и выше.

Для охлаждения и термостабилизации космической аппаратуры и обслуживания с конца 60–х гг. прошлого века нашли широкое применение тепловые трубы (ТТ). В настоящее время в ведущих странах мира уделяется значительное внимание созданию ТТ с высокими теплофизическими характеристиками, которые имеют низкие значения термического сопротивления. В институте проблем материаловедения НАН Украины (ИПМ НАНУ) разработаны высокоэффективные тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами (МВКС), успешно функционирующие в широких диапазонах рабочих температур и плотности тепловых потоков. Однако закономерности капиллярного транспорта и теплообмена при испарении и кипении в капиллярных структурах (КС) различных типов до настоящего времени исследованы недостаточно. Ряд капиллярно-пористых структур, используемых в ТТ, обладает структурными и теплофизическими характеристиками,

© Скороход Валерій Володимирович, академік НАН України, директор Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, Косторнов Анатолій Григорович, академік НАН України, Фролов Геннадій Олександрович, доктор техн. наук, Солнцев Віктор Петрович, кандидат техн. наук — співробітник цього ж інституту.

изменяющимися в широких диапазонах. Среди известных в наше время типов КС (сетчатые, порошковые, ячеистые, волоконные, металлопенные, конструкционные, гофрированные и т.п.) лучше всего отвечают предъявляемым техническим требованиям МВКС, что и определило их выбор и применение при разработке ТТ в ИПМ НАНУ [1].

Широкий диапазон изменения температур на различных участках поверхности КА предъявляет повышенные требования к материалам, предназначенным для использования в качестве тепловой защиты при входе в атмосферу как многоразовых, так и одноразовых космических аппаратов. В ИПМ НАНУ совместно ГП «КБ «Южное» разработан материал, получивший название ЮИПМ, который прошел испытания на стендах ИПМ НАНУ в условиях лучистого и конвективного нагрева. В результате обобщения результатов исследований аблирующих теплозащитных материалов была установлена закономерность, позволяющая прогнозировать предельные тепловые возможности материала.

Исследование теплофизических характеристик тепловых труб с разными теплоносителями и капиллярными структурами

При разработке тепловых труб с новыми капиллярными структурами были проведены исследования гидродинамических процессов при капиллярном транспорте жидкостей–теплоносителей и теплофизических процессов при испарении и кипении на поверхностях с различными КС. Полученные результаты показывают, что волоконные металлические материалы, изготовленные из гладких дискретных волокон заданных размеров, обеспечивают большую высоту капиллярного поднятия жидкостей, чем аналогичные порошковые материалы. Однако они уступают по указанной характеристике комбинированным порошково-волоконным материалам, содержащим точечные (металлический порошок) и линейные (металлические волокна) элементы, приблизительно на 30 %. По-видимому, эти композиции исходных фракций обладают большей удельной поверхностью и порами меньшего размера, т. е. большей свободной поверхностной энергией. В результате происходит подъём жидкости-теплоносителя на большую высоту. При отсутствии градиента давлений жидкость в пористом материале перемещается под действием капиллярного давления, что обусловлено прежде всего размерами среднего гидравлического диаметра данной КС. По этой причине наблюдаемое в разработанных композициях уменьшение размеров пор приводит к увеличению скорости перемещения жидкости по длине образцов также примерно на 30 %.

Были проведены исследования теплофизических процессов испарения и кипения жидкостей на поверхностях с КС в условиях капиллярного транспорта (режим, характерный для тепловых труб) и в условиях “затопления” (или “заливки”), типичных для работы термосифонов. В результате установлено, что начало закипания жидкостей (вода, этанол, ацетон) на поверхностях с пористыми структурами как в условиях капиллярного транспорта, так и в условиях “затопления”, происходит при значительно меньших температурных напорах (разность температур “несущая поверхность” — жидкость), по сравнению с кипением на гладких технических поверхностях. Это обеспечивает и большие значения коэффициентов теплоотдачи. Отмеченный эффект объясняется изменением условий формирования паровых зародышей — потенциальных паровых пузырьков, отводящих большую часть тепла при кипении.

Таблиця.

Сравнительные характеристики тепловых труб различных типов, полученные при испытаниях ТТ на теплофизическом стенде

| № | Тип капиллярно-пористой структуры (КПС) | Характеристики | | | | | |
|--|---|-------------------------|-------------------------------|----------|--|--|---|
| | | Пористость Θ , % | Толщина КС $\delta_{КС}$, мм | Жидкость | Термическое сопротивление ТТ $R_{ТТ}$, К/Вт | Перепад температур ТТ (при $Q = 30$ Вт) ΔT , К | Перепад температур по ТТ (при $Q = 60$ Вт) ΔT , К |
| Тепловые трубы с обычными металловолоконными пористыми структурами | | | | | | | |
| 1 | Металловолоконная | 79,3 | 0,8 | ацетон | 0,182 | 5,46 | 10,92 |
| 2 | Металловолоконная | 80,2 | 0,8 | ацетон | 0,184 | 5,52 | 11,04 |
| 3 | Металловолоконная | 80,9 | 0,8 | ацетон | 0,187 | 5,61 | 11,22 |
| 4 | Металловолоконная | 60,4 | 0,8 | ацетон | 0,153 | 4,59 | 9,18 |
| 5 | Металловолоконная | 59,7 | 0,8 | ацетон | 0,151 | 4,53 | 9,06 |
| Тепловые трубы с градиентными пористыми структурами | | | | | | | |
| 6 | Волокново-порошковая | $\cong 60$ | 0,8 | ацетон | 0,128 | 3,84 | 7,68 |
| 7 | Волокново-порошковая | $\cong 60$ | 0,8 | ацетон | 0,107 | 3,21 | 6,42 |
| 8 | Волокново-порошковая | $\cong 60$ | 0,8 | ацетон | 0,109 | 3,27 | 6,54 |
| 9 | Переменная Θ (по площади) | 87/40 | 0,8 | ацетон | 0,068 | 2,04 | 4,08 |
| 10 | Переменная Θ (по площади) | 87/40 | 0,8 | ацетон | 0,066 | 1,98 | 3,96 |
| 11 | Переменная Θ (по длине ТТ) | 87- 50 | 0,8 | ацетон | 0,065 | 1,95 | 3,90 |
| 12 | Переменная Θ (по длине ТТ) | 87- 50 | 0,8 | ацетон | 0,062 | 1,86 | 3,72 |
| 13 | Переменная Θ (по длине ТТ) | 87- 50 | 0,8 | ацетон | 0,060 | 1,80 | 3,60 |
| 14 | Переменная Θ (по длине ТТ) | 87- 50 | 0,8 | ацетон | 0,057 | 1,71 | 3,42 |

Установлено, що чем больше теплопроводностью обладает пористая КС, тем легче осуществляется рост паровых пузырьков на поверхности. Анализ экспериментальных результатов показывает, что с ростом пористости и, соответственно, средних диаметров пор, величины температурного напора начала закипания жидкостей снижается. Это объясняется тем, что с увеличением пористости выход пара через паровые “каналы-стволы” несколько облегчается, так как уменьшается общее гидравлическое сопротивление по паровой фазе.

Необходимо отметить, что условия и процессы образования паровой фазы на поверхностях с пористыми структурами существенно отличаются от аналогичных процессов, характерных для гладких технических поверхностей. Строение пористых структур также может влиять на механизмы испарения и кипения.

Анализ результатов подтверждает, что интенсивность теплообмена при кипении на металловолоконных пористых поверхностях существенно больше по сравнению с порошковыми и сетчатыми пористыми материалами. Это можно объяснить уменьшением суммарного термического сопротивления теплоотдачи. Поскольку порошковые КС также обеспечивают относительно высокие значения коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкими техническими поверхностями, то и комбинация порошковых материалов с волоконными дает возможность получить высокие значения интенсивности теплообмена.

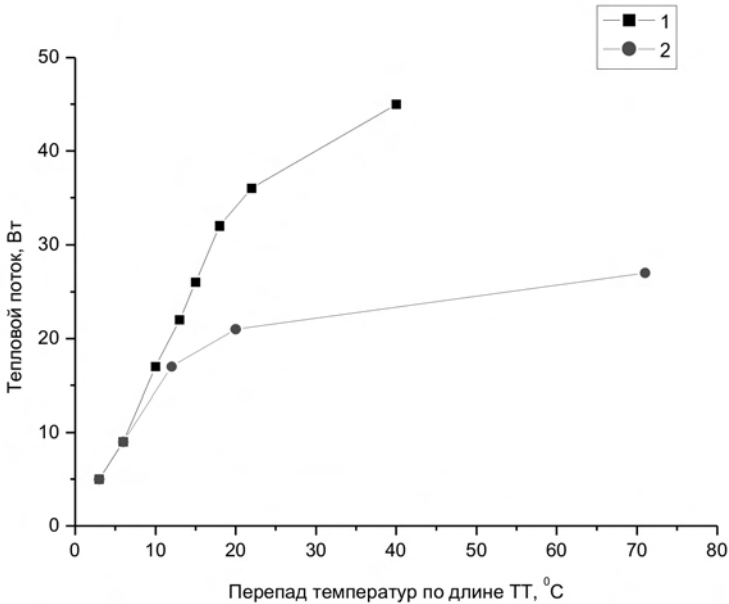


Рис. 1. Влияние характеристик тепловых труб с переменными по длине параметрами на максимальный передаваемый ТТ тепловой поток: 1(верхняя) — тепловая труба с капиллярной структурой переменной пористости; 2 (нижняя) — тепловая труба с капиллярной структурой пористостью 80 %.

Представляет интерес сравнение значений коэффициентов теплоотдачи при испарении и кипении в условиях капиллярного транспорта и “затопле-

ния”. Такие результаты получены впервые. Анализ этих данных свидетельствует о том, что с увеличением толщины и пористости структур различие в коэффициентах теплоотдачи исчезает. В то же время с уменьшением толщины капиллярной структуры (в частности, до 0,4 мм) и пористости (до 40 %) значения коэффициентов теплоотдачи, характерные для условий “затопления”, могут в 2 раза превышать их значения, характерные для условий капиллярного транспорта.

Проведенные исследования стали основой для разработки и конструирования тепловых труб с КС новых типов. Результаты исследований теплофизических характеристик таких ТТ представлены в таблице.

Из таблицы видно, что тепловые трубы, разработанные на базе новых типов капиллярных структур, обладают лучшими теплофизическими характеристиками по сравнению с традиционными ТТ, выполненными с монопошковыми или моноволоконными капиллярными структурами. В частности, новые ТТ имеют более низкие значения общих термических сопротивлений $R_{\text{тг}}$, что обеспечивает при прочих равных условиях меньшую разность температур по длине ТТ. Величина общего термического сопротивления ТТ наряду с максимальными значениями передаваемого ТТ теплового потока Q_{max} и рабочим температурным диапазоном (от 0 до T_{max}) являются их основными рабочими характеристиками.

При горизонтальном расположении ТТ и подводе тепла к зоне с меньшей пористостью ТТ с переменными по длине характеристиками КС обеспечивает передачу теплового потока в 1,7 раза большего, чем ТТ с однородной КС (рис. 1).

При работе ТТ в условиях вертикального расположения (зона нагрева — «внизу») преимущества ТТ с переменными по длине характеристиками сохраняются. Передаваемый ТТ тепловой поток увеличивается до 2 раз по сравнению с «однородной» ТТ. При изменении условий теплоподвода и теплоотвода (подвод тепла к «высокопористому» участку ТТ) наблюдается «обратный» эффект — характеристики ТТ ухудшаются по сравнению с «однородной» ТТ.

Разработка многоразовой металлической тепловой защиты

Наряду с неметаллическими материалами, которые в основном применялись для теплозащитных покрытий (ТЗП) МКС «Шатгл» и «Буран», все большее внимание уделяется разработке металлических систем тепловой защиты. Естественно, что эти системы, кроме высокой механической прочности, должны также удовлетворять всем другим требованиям, предъявляемым к ТЗП МКС:

- выдерживать в течение более 20 минут температуру на поверхности 1100 °С (не менее 100 циклов нагрева);
- обеспечивать температуру холодной поверхности ТЗП не более 200 °С;
- обладать высокой излучательной способностью ($> 0,85$);
- противостоять термическим, механическим, акустическим и вибрационным нагрузкам;
- иметь малый удельный вес на единицу поверхности ($\sim 10 \text{ кг/м}^2$) и т. п.

В настоящее время наиболее перспективными считаются сплавы на никелевой (PM-1000) и железной основе (PM-2000).

При разработке нового сплава ЮИПМ (совместно с ГП «КБ «Южное») был использован опыт, накопленный при создании материалов с элементами

самоорганизации [2], и проведены исследования наиболее перспективных сплавов на основе нихрома. В результате была предложена новая лабораторная технология, не допускающая окисления порошка и обеспечивающая достаточную чистоту границ зерен по примесям внедрения. За счет этого низкотемпературная пластичность материала была повышена почти в 2 раза и обеспечена равномерная скорость окисления по всей поверхности сплава. Образовавшаяся защитная пленка имеет темный цвет (степень черноты 0,92) и прочно связана с металлической основой.

Полученный материал имеет высокую пластичность при низких температурах. Благодаря этому появляется возможность дополнительного повышения высокотемпературной длительной прочности за счет увеличения содержания упрочняющей инертной добавки — оксида иттрия.

Было установлено, что степень черноты неокисленной поверхности образца в диапазоне длины волн 1,4–1,85 мкм составляет $0,78 \pm 0,05$. После тридцатиминутного нагрева в струе газогенератора ее значение повышается до $0,92 \pm 0,02$ и в дальнейшем остается неизменным.

Ресурсные испытания металлической пластины из сплава ЮИПМ размером 100x100 мм, толщиной 1,7 мм и начальным весом 143,9 г. были проведены на гелиоустановке СГУ-7 (рис. 2). Через 20 циклов нагрева с выдержкой при температуре 1100 °С по 20 минут ее вес составил 144 г. Таким образом, эти эксперименты подтвердили работоспособность разработанного сплава на образцах с размерами, близкими к натурным.

Для объяснения удовлетворительной работоспособности разработанного сплава был выполнен рентгеноструктурный и металлографический анализы. Анализ рентгенограмм образцов до их испытаний показал, что линии промышленного нихрома имеют значительно большую ширину по сравнению с линиями сплава ЮИПМ. Это свидетельствует о большей степени гомогенности предложенного сплава, которая объясняется воздействием на его структуру горячей обработки давлением в процессе прокатки.



Рис. 2. Ресурсные испытания металлической пластины из сплава ЮИПМ размером 100x100 мм на гелиоустановке СГУ-7.

При сравнении рентгенограмм окисленных сплавов установлено, что окисная пленка на промышленном сплаве образована в основном окислом никеля (NiO), а пленка сплава ЮИПМ состоит главным образом из шпинели (NiCr₂O₄). По-видимому, с этим и связана большая стойкость против окисления сплава ЮИПМ, поскольку известно, что никель-хромовая шпинель обладает более высокими защитными свойствами, чем оксид никеля [3].

Предельная энергоемкость внутренних и поверхностных процессов поглощения тепла аблирующей тепловой защитой

В отличие от многоразовой тепловой защиты, для которой основным фактором отвода тепла является излучение с поверхности, аблирующая тепловая защита большую часть тепла поглощает при вдуве газообразных продуктов разрушения в высокотемпературный пограничный слой и за счет физико-химических превращений на поверхности материала (поверхностные процессы поглощения тепла). Внутренние процессы поглощения тепла (теплоемкость) и излучение с поверхности имеют существенное значение при сравнительно невысоких температурах (энтальпиях) набегающего газового потока и высоких коэффициентах теплообмена (α/c_p)₀.

В процессе обобщения результатов расчетно-экспериментальных исследований аблирующих теплозащитных материалов [4] была установлена закономерность, заключающая в том, что предельная энергоемкость внутренних процессов поглощения тепла достигается при равенстве толщин прогретого и унесенного слоев материала, а предельная энергоемкость унесенного слоя – при равенстве значений максимального теплового эффекта физико-химических превращений на поверхности и тепла, поглощаемого и излучаемого материалом в процессе перехода из твердого в газообразное состояния с учетом эффекта вдува.

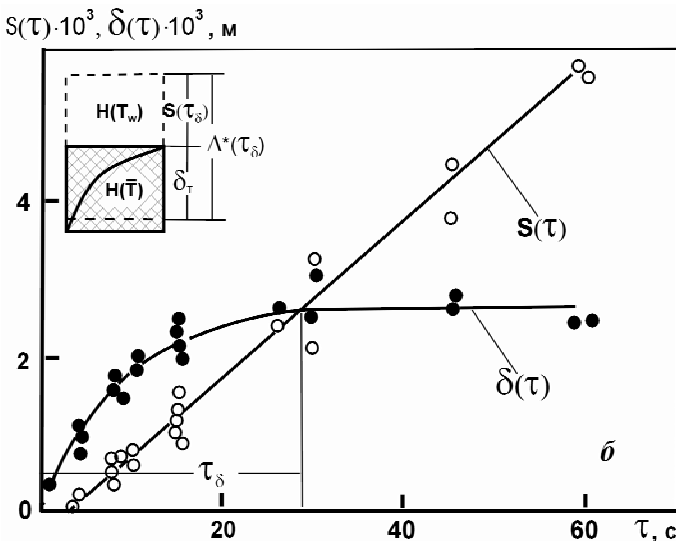


Рис. 3. Зависимость линейного уноса $S(\tau)$ и толщины прогретого слоя $\delta(\tau)$ для легированной кварцевой стеклокерамики от времени нагрева: точки — эксперимент, линии — аппроксимация; светлые точки – линейный унос, черные точки – глубина прогрева до температуры 1800 К.

Максимальное количество тепла, которое может быть поглощено за счет теплоемкости внутренних слоев материала, достигается при равенстве скоростей перемещения изотермы T^* , ограничивающей прогретый слой, и скорости разрушения материала. Однако прогретый слой можно ограничить изотермой с любой T^* ниже температуры нагреваемой поверхности. По мере снижения температуры рассматриваемой изотермы возрастает ее скорость и к моменту установления квазистационарного режима прогрева τ_δ путь, пройденный этой изотермой, будет тем больше, чем ниже ее температура. В этот момент прогретый слой достигает максимальной толщины, а количество тепла, накопленного в нем, — предельного значения. При продолжении теплового воздействия все изотермы, температура которых выше величины T^* , ограничивающей прогретый слой, будут перемещаться со скоростью, равной стационарной скорости разрушения поверхности материала.

В момент установления квазистационарного режима прогрева для любой изотермы температурного поля T^* толщина унесенного слоя будет равна глубина залегания рассматриваемой изотермы (рис. 3).

Установленная закономерность поясняется схемой, приведенной на рис. 4. Из рисунка видно, что если для изотерм характерно снижение скорости перемещения от максимального значения до стационарной скорости уноса массы \bar{V}_∞ , то скорость перемещения поверхности увеличивается от 0 до \bar{V}_∞ .

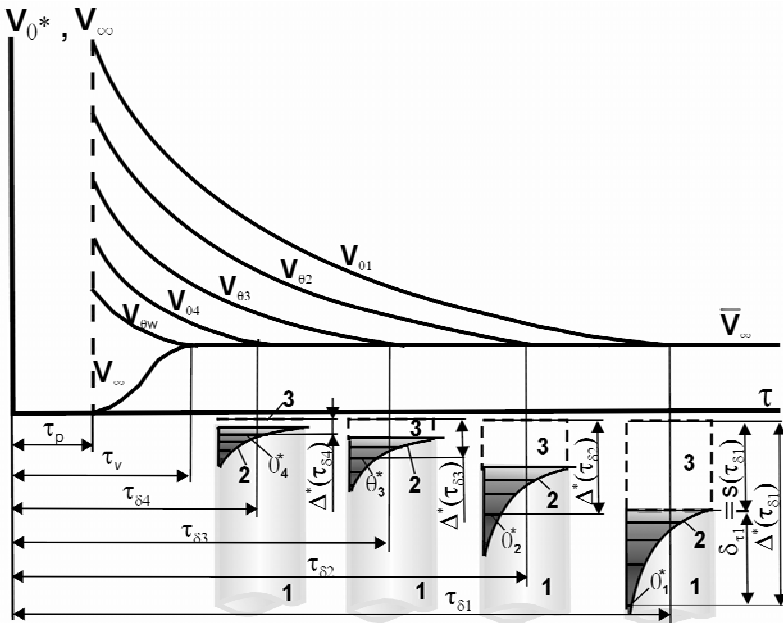


Рис. 4. Модель прогрева и уноса массы ТЗП: 1 – образец, 2 – профиль температуры, 3 – унесенный слой, $\theta_1^* - \theta_4^*$ – изотермы, ограничивающие прогретый слой, толщина которого равна унесенному слою.

При ламинарном режиме обтекания, отсутствие эрозионного уноса и горения на поверхности появляется возможность определения предельного количества тепла, которое может поглотить материал при тепловом разрушении.

Было обнаружено, что, если при безразмерной скорости уноса массы $\bar{G}_\Sigma = G_\Sigma / (\alpha / c_p)_0 < 0,5$ (где G_Σ – массовая скорость уноса) прогрев и теп-

ловое разрушение определяются начальным темпом нагрева поверхности материала и тепло в основном поглощается за счет внутренних процессов, то при $\bar{G}_\Sigma \geq 0,5$ на первое место выходят поверхностные процессы поглощения тепла (тепловые эффекты физико-химических превращений на поверхности и вдува).

При скорости уноса массы, превышающей $\bar{G}_\Sigma \geq 0,5$, вклад теплосодержания материала по сравнению с теплотой, поглощаемой за счет физико-химических превращений на поверхности и эффекта вдува, резко уменьшается. Было показано [5], что результаты экспериментальных исследований материалов различных классов и численных расчетов уноса массы кварцевого стекла в диапазоне энтальпии торможения $I_e = 10\,000 - 50\,000$ кДж/кг и давления торможения $P_e = 10^4 - 10^7$ Па можно представить выражением

$$\bar{G}_w \approx \sqrt{\frac{I_e - I_w}{H}} - 0,3. \quad (1)$$

Здесь \bar{G}_w – безразмерная скорость уноса газообразных продуктов испарения материала.

Кроме того, обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов показала, что нормирующий множитель H в (1) приблизительно равен удвоенному максимальному тепловому эффекту поверхностных процессов $(\Delta Q_w)_{\max}$, а «фокус» $\sim 0,3$ (рис. 5).

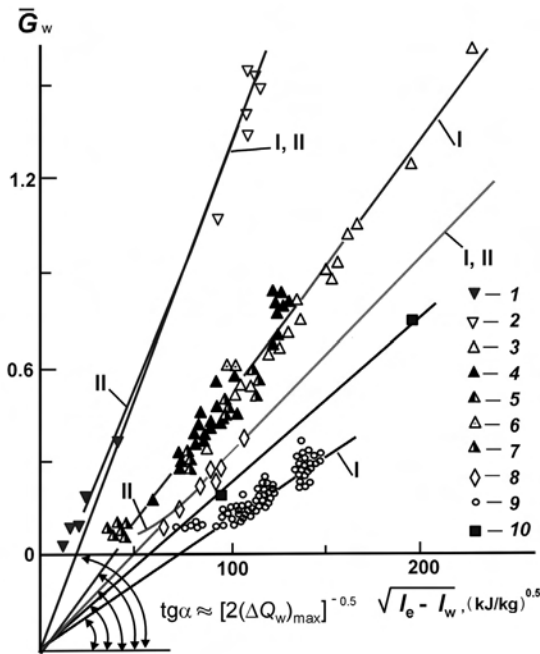


Рис. 5. Зависимость безразмерной скорости уноса \bar{G}_w от перепада энтальпии: 1, 2 – фторопласт (1 – аргон, 2 – азот, $P_e = 1 \cdot 10^5$ Па) [6]; 3–7 – стеклопластик на эпоксидном связующем (3 – воздух, $P_e = 1 \cdot 10^5$ Па, 4 – воздух, $P_e = 1 \cdot 10^5$ Па, 5 – азот, $P_e = 1 \cdot 10^5$ Па, 6 – воздух, $P_e = 0,3 \cdot 10^5$ Па, 7 – газогенератор, $P_e = 3,5 \cdot 10^5$ Па; 8 – легированная кварцевая стеклокерамика (воздух, $P_e = 1 \cdot 10^5$ Па); 9 – графит (воздух, $P_e = (0,3 \div 4,2) \cdot 10^5$ Па) [7]; 10 – углепластик (воздух, $P_e = 1 \cdot 10^5$ Па); I – расчет по (1), II – расчет по уравнению баланса тепла.

В данном случае под $(\Delta Q_w)_{\max}$ для фторопласта подразумевается теплота разложения, для стеклопластика и кварцевой стеклокерамики – суммарный тепловой эффект физико-химических превращений при температуре кипения, а для графита – максимальное значение теплоты сублимации.

Параметр стабилизации уноса массы $H \approx 2(\Delta Q_w)_{\max}$ показывает, что максимальное количество тепла, которое может быть поглощено уносимым материалом, достигается при равенстве значений максимального теплового эффекта физико-химических превращений на поверхности и тепла, поглощаемого и излучаемого материалом в процессе перехода из твердого в газообразное состояния.

Эти положения признаны открытием (диплом №298 от 15.12.2005 г.) и имеют важное значение для создания теплозащитных материалов с заданным и управляемым комплексом свойств.

Представлены результаты разработки и технологий получения новых материалов и конструктивных решений для обеспечения теплового режима работы космических аппаратов. Среди них — тепловые трубы с использованием различных капиллярных структур, создание многоразовой тепловой защиты с использованием металлов, реализация процесса абляции.

Ключевые слова: тепловой режим, космические аппараты, тепловые трубы, капиллярные структуры, металлическая тепловая защита, абляция.

Results of creation of new materials and constructive decisions for heat regimes space apparatus are shown. Among there — heat pipes with different capillary structures, many times using metal heat defense, ablation.

Keywords: heat regimes, space apparatus, heat pipes, capillary structures, metal heat defense, ablation.

1. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Два тома. – 2002. К.: Наук. думка. – 1112 с.
2. Solntsev V.P., Skorokhod V.V., Tykhyy V.G., Frolov G.A., Kostornov A.G. Influencing different ingredients on the tribological characteristics of compositions on the basis of plastic metals in vacuum // Proceeding 9th International Symposium Materials in a Space Environment ESA, Noordwijk, Netherlands. June 16 — 21. 2003. – P.
3. Скороход В.В., Солнцев В.П., Солонин С.М., Фролов Г.А., Тихий В.Г., Попанов А.М. Металлический материал для многоразовой тепловой защиты // 3-я Международная конференция "Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы" 19-23 ноября 2007 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.
4. Полежаев Ю. В., Фролов Г. А. Тепловое разрушение материалов / Под ред. академика НАН Украины В. В. Скорохода. – 2006. – К.: Академперіодика. – 354 с.
5. Frolov G. A. The Constant of Thermal Destruction and Its Role in the Processes of Heating and Entrainment of Mass of a Material, Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2004. **77**, No.3. – С. 489–520.
6. Юревич Ф. Б. Поведение полимерных материалов в плазменной струе // Тепло- и массоперенос и тепловые свойства материалов. – Минск: ИТМО АН БССР, 1969. – С. 145–154.
7. Ланделл Дж. Х., Дикки Р. Р. Абляция графита АТJ при высоких температурах // Ракет. техн. и космонавтика. — 1973, **11**, №2. — С. 111–119.