

УДК 629.7.018.023:536.3.001.2

## **ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЖИДКОГО РАСПЛАВА ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПРОГРЕВ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**В.А. БУРАКОВ**

*НИИ прикладной математики и механики, Томск*

Разработаны физико-математическая модель, численный алгоритм и программа нестационарного прогрева теплозащитных материалов с учетом процесса кристаллизации жидкого расплава конденсированной фазы оксидов металлов на их поверхности в период теплового последствия. В результате численных расчетов установлено влияние процесса кристаллизации жидкого расплава оксида алюминия на нестационарный прогрев типичного углеграфитового теплозащитного материала в характерной для энергоустановок области изменения параметров.

Теплофизическая проблема взаимодействия высокоскоростных и высокотемпературных двухфазных потоков, содержащих твердые или жидкие частицы, имеет важное практическое значение при проектировании гиперзвуковых летательных аппаратов и энергоустановок с двухфазным рабочим телом.

Во внешней задаче несущей фазой двухфазного потока является атмосфера Земли и других планет, а дисперсной фазой — частицы пыли, льда и капли дождя. Воздействие дисперсной фазы в основном заключается в преобразовании части кинетической энергии частиц в тепловую при соударении с поверхностью и в ударной эрозии обтекаемого тела. В работах [1 – 4] изучалось теплоэрозионное разрушение материалов в сверхзвуковых высокотемпературных двухфазных потоках в характерной для условий внешней задачи области изменения параметров.

Во внутренней задаче несущей фазой двухфазного потока являются газообразные продукты сгорания, а дисперсная (конденсированная) фаза представляет собой жидкие частицы оксидов металлов ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $ZrO_2$  и др.). Здесь наблюдается более широкий спектр механизмов теплового, химического и механического воздействия конденсированной фазы (К-фазы) на нестационарный прогрев и разрушение теплозащитных материалов [5]. В [6 – 10] представлены физико-математические модели теплофизических процессов взаимодействия до- и сверхзвуковых высокотемпературных двухфазных потоков с разрушающимися теплозащитными материалами (ТЗМ) при инерционном осаждении жидких частиц К-фазы оксидов металлов в характерной для энергоустановок области изменения параметров. Однако в ряде случаев существенную роль в нормальном функционировании энергоустановок играет так называемый период теплового последствия (охлаждения), когда происходит перераспределение теплоты, аккумулированной материалами в период работы. В период последствия важное значение приобретает длительное тепловое воздействие в статических условиях “лужиц” расплавов К-фазы оксидов металлов, приводящее к нежелательным явлениям: аномально высокой термодеструкции коксующихся ТЗМ и к растрескиванию углеграфитовых ТЗМ за

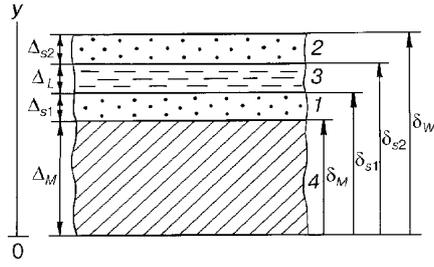


Рис. 1. Схема кристаллизации жидкого расплава К-фазы оксидов металлов на поверхности ТЗМ.

1 — твердый шлак 1, 2 — твердый шлак 2, 3 — расплав, 4 — ТЗМ.

счет растягивающих термических напряжений, возникающих в условиях охлаждения.

Цель данной работы — численное исследование влияния процесса кристаллизации расплава К-фазы оксидов металлов на нестационарный прогрев ТЗМ, не подвергающихся внутренним физико-химическим превращениям, в период теплового последействия.

Принимается следующая четырехстадийная физическая модель динамики процесса кристаллизации расплава К-фазы оксидов металлов на поверхности ТЗМ в период теплового последействия. В первой стадии ( $0 < t \leq t_{s1}$ ) происходит охлаждение системы ТЗМ — расплав К-фазы до пороговой температуры кристаллизации в контакте. Во второй стадии ( $t_{s1} < t \leq t_s$ ) начинается кристаллизация слоя расплава К-фазы, прилегающего к ТЗМ, и образуется твердый шлак 1, толщина которого со временем увеличивается. В третьей стадии ( $t_{s2} < t \leq t_s$ ), после достижения температуры кристаллизации на поверхности происходит затвердевание слоя расплава К-фазы у границы раздела сред и образуется твердый шлак 2 (корка), толщина которого также увеличивается со временем. В этой стадии оба фронта кристаллизации двигаются по направлению друг к другу. Время полной кристаллизации  $t_s$  расплава К-фазы определяется моментом встречи двух фронтов кристаллизации. В четвертой стадии ( $t_s < t \leq t_b$ ) наблюдается дальнейшее охлаждение системы ТЗМ — твердый шлак К-фазы при отсутствии процесса кристаллизации.

При математическом моделировании вводятся следующие основные допущения: задача решается в одномерном приближении для плоской стенки; выполняются условия идеального теплового контакта между К-фазой и поверхностью ТЗМ; химические реакции отсутствуют; расплав и твердый шлак К-фазы рассматриваются как непрозрачные для излучения среды; расплав К-фазы неподвижен и полностью состоит из оксида металла; на наружной поверхности стенки выставляются граничные условия теплоизоляции.

В рамках принятых допущений нестационарный прогрев ТЗМ с учетом процесса кристаллизации расплава К-фазы на их поверхности в период теплового последействия описывается математической моделью двухфронтной задачи Стефана (рис. 1):

$$(\rho c)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad 0 < y < \delta_w, \quad 0 < t \leq t_b, \quad (1)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{\delta_w-0} = q_w, \quad (2)$$

$$\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial y} \Big|_{\delta_{s1}+0} = \lambda_s \frac{\partial T_{s1}}{\partial y} \Big|_{\delta_{s1}-0} + \rho_s \dot{\Delta}_{s1}(t) \Delta H_L^0, \quad (3)$$

$$T_L \Big|_{\delta_{s1}+0} = T_{s1} \Big|_{\delta_{s1}-0} = T_L^0, \quad t_{s1} < t \leq t_s,$$

$$\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial y} \Big|_{\delta_{s2}-0} = \lambda_s \frac{\partial T_{s2}}{\partial y} \Big|_{\delta_{s2}+0} + \rho_s \dot{\Delta}_{s2}(t) \Delta H_L^0, \quad (4)$$

$$T_L \Big|_{\delta_{s2}-0} = T_{s2} \Big|_{\delta_{s2}+0} = T_L^0, \quad t_{s2} < t \leq t_s,$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{\delta_M+0} = \lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial y} \Big|_{\delta_M-0}, \quad (5)$$

$$T_i \Big|_{\delta_M+0} = T_M \Big|_{\delta_M-0} = T_k(t),$$

$$\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial y} \Big|_{+0} = 0, \quad (6)$$

где  $T$  — температура;  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  — плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности;  $T_L^0$ ,  $\Delta H_L^0$  — температура и удельный тепловой эффект кристаллизации;  $\delta_M$  — толщина ТЗМ;  $\delta_{s1}(t)$ ,  $\delta_{s2}(t)$  — текущее положение фронтов кристаллизации;  $\delta_w$  — положение границы раздела сред;  $q_w$  — тепловой поток на границе раздела сред;  $y$  — нормальная координата;  $t$  — время. Индексы  $i = M, s1, s2, L$  относятся соответственно к ТЗМ, твердым шлакам 1, 2 и расплаву К-фазы, индекс  $k$  — к условиям в контакте.

При постановке граничных условий на поверхности расплава или твердого шлака К-фазы оксидов металлов имеются известные трудности, связанные с недостаточной изученностью течений и теплофизических процессов в газовой фазе энергоустановок в период теплового последействия. Поэтому выставляются три варианта граничных условий (типа предложенных ранее в [11]), отвечающих физически реалистичным гипотезам свободно-конвективного охлаждения, теплоизоляции и радиационного охлаждения:

$$q_w = \begin{cases} \alpha_b (T_b - T_w), \\ 0, \\ A_{эф} \sigma_0 (T_b^4 - T_w^4), \end{cases} \quad (7)$$

где  $\alpha_b$  — коэффициент конвективной теплоотдачи, определяющийся по критериальным зависимостям [12];  $T_b$  — температура газа, равная температуре продуктов сгорания после адиабатического расширения до атмосферного давления [11];  $T_w$  — переменная во времени температура границы раздела сред;  $A_{эф}$  — эффективная функция радиационных свойств газа и поверхности;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана — Больцмана.

В качестве начальных условий задается профиль температур в системе ТЗМ — жидкий расплав К-фазы при  $t = 0$ , отвечающий в данном случае моменту окончания работы энергоустановки.

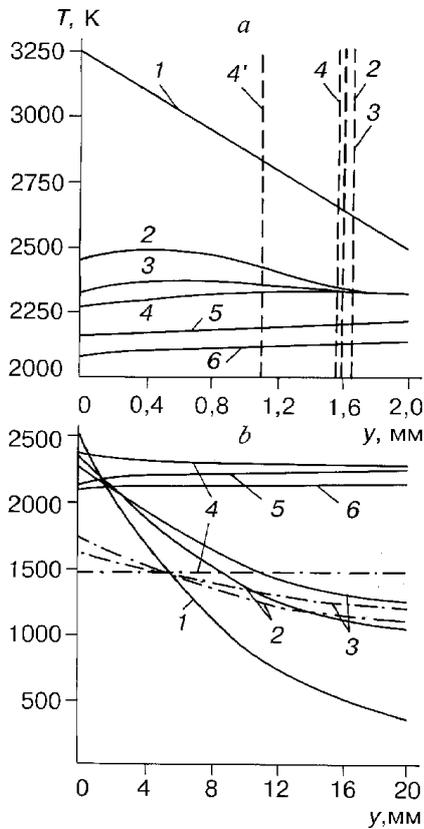
Представленная математическая модель (1) – (7) позволяет определять нестационарные температурные поля в расплаве К-фазы оксидов металлов, в твердых шлаках 1, 2 и ТЗМ, а также текущие положения фронтов кристаллизации и скорость их движения в период теплового последействия.

Численная реализация математической модели проводилась методом конечных разностей. Для устранения нелинейности, связанной с наличием фронтов кристаллизации, имеющих заранее неизвестную скорость, применялся основанный на постановке Ландау метод выпрямления фронта [13]. В каждой

из областей интегрирования дифференциальные операторы заменялись конечно-разностными аналогами с помощью четырехточечной полностью неявной двухслойной по времени одношаговой итерационной схемы, имеющей погрешность аппроксимации во внутренних узлах сетки  $O(\tau + h_i^2)$ , где  $\tau, h_i$  — сеточные параметры. Аппроксимация граничных условий была не хуже, чем во внутренних узлах сетки. Система разностных уравнений решалась методом скалярной прогонки [14] до выполнения условий сходимости итераций по температурному полю с заданной точностью  $10^{-4} - 10^{-5}$ . Контроль вычислений осуществлялся путем проверки интегрального баланса тепла на каждом временном слое. Разработана версия вычислительной программы AGMFRIZ для персонального компьютера.

Проводилось численное исследование основных закономерностей нестационарного прогрева типичного углеграфитового ТЗМ с учетом процесса кристаллизации оксида алюминия на его поверхности в период теплового последействия. В опорном расчете использовались следующие основные исходные данные, соответствующие области изменения параметров в энергоустановках [11]:  $T_b = 1500$  К;  $\alpha_b = 40$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $A_{эф} = 0,1$ ;  $\Delta_M = 2 \cdot 10^{-2}$  м;  $\Delta_{L,0} = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_w = 2,2 \cdot 10^{-2}$  м;  $T_L^0 = 2327$  К;  $\Delta H_L^0 = 1,15 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $t_b = 120$  с. Начальный профиль температур в расплаве и материале показан на рис. 2. В опорном расчете применялась гипотеза комбинированного свободно-конвективного и радиационного охлаждения. Теплофизические и другие характеристики К-фазы оксида алюминия в жидком и твердом состояниях брались по данным [15 - 17]. Теплофизические характеристики углеграфитового ТЗМ ( $\lambda_M = \lambda_M(T)$ ,  $C_M = C_M(T)$ ) задавались табличным путем.

На рис. 2, а в локальной системе координат представлены результаты



расчета нестационарных температурных полей в расплаве оксида алюминия в различные моменты времени. Вертикальными штрихами 2 - 4 обозначены текущие положения твердого шлака 1  $\Delta_{s1}$  в моменты времени  $t = 2,06$ ; 3,19; 28,19 с, а штрихом 4' — твердого шлака 2  $\Delta_{s2}$  в момент времени  $t = 28,19$  с. Обращает на себя внимание максимум в распределении температур (кривые 2, 3) в моменты времени  $t_{s1} < t < t_{s2} + 0$ , достигающий значений  $\Delta T = T_{max} - T_w = 40 - 60$  К и возрастающий с интенсивностью условий охлаждения. При этом твердый шлак 1, как и расплав, находится практически в изотермических условиях прогрева в случае  $t > t_{s2} + 0$ . В твердом шлаке 2 температура по толщине корки изменяется по линейному закону и оказывается не

Рис. 2. Нестационарные температурные поля в жидко-твердом шлаке оксида алюминия на поверхности углеграфитового ТЗМ (а) и в углеграфитовом ТЗМ (б).

1 — начальный профиль температур,  $t = 0$ ;  $t = 2,06$  с (2), 3,19 (3), 28,19 (4), 80 (5), 120 с (6). Штрихпунктирные линии на рис. б — без учета процесса кристаллизации. Поясн. см. в тексте.

зависящей от толщины и условий охлаждения. Эта информация может быть полезной для приближенного аналитического моделирования рассматриваемых процессов.

На рис. 2, *b* в локальной системе координат представлено распределение температур по толщине углеграфитового ТЗМ. Как видно, процесс кристаллизации расплава оксида алюминия оказывает заметное влияние на нестационарный прогрев материала в период теплового последействия по сравнению с расчетом в приближении инертного (жидкого) слоя К-фазы, когда при  $t > 25$  с имеет место квазистационарный прогрев углеграфитового ТЗМ.

На рис. 3 приведены результаты расчетов среднеинтегральных (по толщине) температур углеграфитового ТЗМ  $\langle T_M \rangle$  в функции времени. Видно, что эффект кристаллизации приводит к увеличению  $\langle T_M \rangle$  на 31,7 % в момент времени 120 с. Если в опорном расчете период теплового последействия  $t_b$  увеличить с 120 до 360 с, то можно достигнуть квазистационарного режима прогрева всей системы ТЗМ — твердый шлак К-фазы, отвечающего условию  $\langle T_M \rangle = \langle T_s \rangle = 2110$  К, где  $\langle T_s \rangle$  — среднеинтегральная по толщине температура твердого шлака К-фазы.

На рис. 4 представлены результаты опорного расчета текущего положения фронтов кристаллизации  $\Delta_{s1}$ ,  $\Delta_{s2}$  и толщины расплава оксида алюминия  $\Delta_L$  в различные моменты времени. Видно, что в третьей стадии процесса кристаллизации, когда у границы раздела сред образуется тонкая корка, скорость продвижения фронта кристаллизации  $\dot{\Delta}_{s1}(t)$  существенно уменьшается и при  $t > 13,19$  с значение  $\Delta_{s1}$  практически постоянно. В то же время скорость фронта кристаллизации  $\dot{\Delta}_{s2} = \dot{\Delta}_{s2}(t)$  остается постоянной. Перечисленные особенности обусловлены характером распределения температурных полей при  $t > t_{s2} + 0$ , когда в жидкой фазе и твердом шлаке 1 отсутствуют градиенты температур.

Важность постановки обоснованных граничных условий на поверхности расплава или затвердевшей корки следует из данных численных расчетов, проведенных с использованием условий свободно-конвективного охлаждения, теплоизоляции и радиационного охлаждения. Результаты, показанные на рис. 3, 4, свидетельствуют о том, что при использовании условия теплоизоляции имеет место качественное изменение картины процесса кристаллизации:

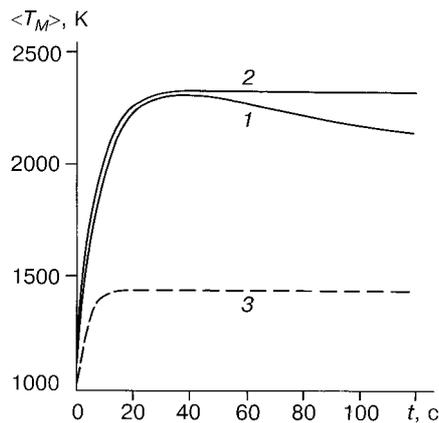


Рис. 3. Изменение среднеинтегральной температуры углеграфитового ТЗМ.  
1 — расчет, 2 — условие теплоизоляции, 3 — без учета процесса кристаллизации.

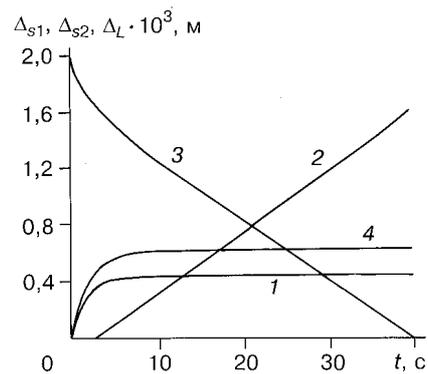


Рис. 4. Динамика процесса кристаллизации расплава оксида алюминия на поверхности углеграфитового ТЗМ.  
1 —  $\Delta_{s1}$ , 2 —  $\Delta_{s2}$ , 3 —  $\Delta_L$ , 4 —  $\Delta_{s1}$  в условиях теплоизоляции.

затвердевшая корка из поверхности не образуется:  $\langle T_L \rangle = T_L^0 + 0$ ;  $\langle T_{s1} \rangle = T_L^0 - 0$  после  $t = 10$  с и  $\langle T_M \rangle = T_L^0 - 0$  после  $t = 80$  с. Условия свободно-конвективного и радиационного охлаждения не искажают качественной картины процесса, и кривые  $\langle T_M \rangle = \langle T_M \rangle(t)$  лежат между кривыми 1, 2 (см. рис. 3). Увеличение коэффициента конвективной теплоотдачи в два раза по сравнению с опорным расчетом приводит к сокращению времени полной кристаллизации  $t_s$  на 21 %, повышению  $\Delta_{s1}$  на 35,7 % и уменьшению  $\Delta_{s2}$  на 9,5 %. Увеличение эффективной функции радиационных свойств в три раза вызывает еще большие изменения: падение  $t_s$  на 49 %, рост  $\Delta_{s1}$  на 42, 8 % и уменьшение  $\Delta_{s2}$  на 11,4 %. При этом среднеинтегральные температуры  $\langle T_M \rangle(t_b)$  убывают до 2063 и 1910 К соответственно. Такая высокая чувствительность нестационарного прогрева ТЗМ при кристаллизации расплава оксида алюминия к постановке граничных условий на поверхности требует тщательного исследования течений и теплофизических процессов в газовой фазе энергоустановок в период теплового последействия, особенно радиационного теплообмена.

Процесс кристаллизации расплава оксида алюминия на поверхности углеродитового ТЗМ характеризуется следующими интегральными параметрами: временем достижения температуры кристаллизации в контакте  $t_{s1}$ , временем достижения температуры кристаллизации на поверхности  $t_{s2}$ , максимальной толщиной твердого шлака 1  $\Delta_{s1}(t_s)$ , максимальной толщиной твердого шлака 2  $\Delta_{s2}(t_s)$ , среднеинтегральной температурой материала  $\langle T_M \rangle(t_b)$ . Влияние на эти характеристики постановки граничных условий, температуры газа и толщины расплава (при прочих равных условиях опорного расчета) иллюстрируют результаты, представленные в таблице. Как видно, наиболее консервативным параметром является время  $t_{s1}$ , которое главным образом определяется начальным профилем температур в расплаве и его толщиной. Факторы высокотемпературного теплообмена, оказывающие наибольшее влияние на нестационарный прогрев углеродитового ТЗМ, по степени значимости в исследуемом диапазоне параметров можно расположить в последовательности:  $A_{эф}$ ,  $T_b$ ,  $\alpha_b$ . Увеличение толщины расплава в три раза вызывает повышение  $\langle T_M \rangle$  на 9,4 %. Расчет с равномерным начальным профилем температур в расплаве  $T(y, 0) = 2875$  К,  $\delta_M \leq y \leq \delta_w$ , соответствующем среднеарифметическому значению температур в опорном расчете, дал следующие интегральные параметры:  $t_{s1} = 0,39$  с,  $t_{s2} = 5,23$  с,  $t_s = 107$  с,  $\Delta_{s1} = 0,49$  мм,  $\Delta_{s2} = 1,51$  мм, т. е. заметным образом повлиял на время полной кристаллизации и значение  $\langle T_M \rangle$ , которое в данном случае составило 2316 К. Такая ситуация указывает на

Сравнение параметров динамики процесса кристаллизации расплава оксида алюминия на поверхности углеродитового ТЗМ

Вариант расчета	$t_{s1}$ , с	$t_{s2}$ , с	$t_s$ , с	$\Delta_{s1}$ , мм	$\Delta_{s2}$ , мм	$\langle T_M \rangle(t_b)$ , К
Комбинированное охлаждение (опорный расчет)	0,066	3,19	39,38	0,42	1,58	2141
Свободно-конвективное охлаждение	0,066	5,08	102,29	0,56	1,44	2311
Теплоизоляция	0,066	–	–	0,61	–	2326
Радиационное охлаждение	0,066	3,77	55,10	0,49	1,51	2221
$T_b = 1000$ К	0,066	2,84	30,82	0,57	1,43	2046
$T_b = 2000$ К	0,066	4,09	74,69	0,47	1,53	2274
$\Delta_{L,0} = 1$ мм	0,274	1,27	19,57	0,32	0,68	2025
$\Delta_{L,0} = 3$ мм	0,035	5,68	62,97	0,68	2,32	2216

важность адекватного математического моделирования предыстории теплофизических процессов взаимодействия высокотемпературных двухфазных потоков продуктов сгорания с разрушающимися ТЗМ в период работы энергоустановок.

Таким образом, в результате численного исследования в рамках математической модели двухфронтной задачи Стефана установлено влияние процесса кристаллизации расплава К-фазы оксида алюминия (“лужиц”) на нестационарный прогрев углеграфитового ТЗМ в области изменения параметров, характерной для периода теплового последствия энергоустановок. Причиной этого являются наличие высокотемпературных фронтов кристаллизации, высвобождение скрытой теплоты фазового перехода и образование по мере охлаждения все более теплопроводных твердых шлаков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полежаев Ю.В., Шишков А.А. Газодинамические испытания тепловой защиты. — М.: Промедэк, 1992. — 247 с.
2. Полежаев Ю.В., Михатулин Д.С. Эрозия поверхности в гетерогенных потоках. — М., 1989. — 67 с. — (Препр. / ИВТАН; № 2-277).
3. Богачев В.В., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Методические основы проведения исследований в высокотемпературных гетерогенных потоках. — М., 1991. — 84 с. — (Препр. / ИВТАН; № 2-331).
4. Деревщиков В.Б., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Шебеко В.Н. Возможности моделирования и стенды для теплоэрозионных исследований. — М., 1994. — 62 с. — (Препр. / ИВТАН; № 2-383).
5. Бураков В.А. Классификация механизмов и физические модели взаимодействия частиц конденсированной фазы с разрушающимися теплозащитными материалами // ТВТ. — 1992. — Т. 30, № 3. — С. 533 – 542.
6. Бураков В.А., Санду С.Ф. Тепломассоперенос при шлаковании поверхности углепластиковых теплозащитных материалов в высокотемпературном двухфазном потоке // Сиб. физ.-техн. журн. — 1993. — Вып. 2. — С. 98 – 103.
7. Бураков В.А., Санду С.Ф. Термохимическое разрушение углепластиковых теплозащитных материалов в высокотемпературном двухфазном потоке // ФГВ. — 1992. — Т. 28, № 6. — С. 51 – 60.
8. Бураков В.А., Санду С.Ф., Краскова С.И. Термоэрозионное разрушение коксующихся теплозащитных материалов в сверхзвуковых двухфазных потоках // ТВТ. — 1992. — Т. 30, № 4. — С. 790 – 798.
9. Бураков В.А. Модель очагового химического реагирования жидкого агломерата конденсированной фазы на поверхности коксующихся теплозащитных материалов // ФГВ. — 1995. — Т. 31, № 3. — С. 9 – 18.
10. Бураков В.А. Математическое моделирование пленочного химического реагирования конденсированной фазы оксидов металлов с теплозащитными материалами // ПМТФ. — 1996. — Т. 37, № 1. — С. 139 – 144.
11. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.
12. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.
13. Будак Б.М., Гольдман Н.А., Успенский А.Б. Разностные схемы с выпрямлением фронтов для многофронтных задач типа Стефана // Докл. АН СССР. — 1966. — Т. 167, № 4. — С. 735 – 738.
14. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1982. — 616 с.
15. Маурах М.А., Митин Б.С. Жидкие тугоплавкие окислы. — М.: Metallurgia, 1979. — 288 с.
16. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. — М.: Metallurgia, 1978. — 472 с.
17. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы). — Л.: Энергия, 1973. — 336 с.

*Статья поступила в редакцию 4 декабря 1997 г.*