

## ГИДРОДИНАМИКА И АБЛЯЦИЯ ОПЛАВЛЯЮЩИХСЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ\*

В.А. БУРАКОВ, И.Е. ТИМАШЕВА, И.В. ЩЕРБАКОВА

*НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете, Россия*

e-mail: bva@nipmmm.tsu.ru

A new physical and mathematical model, two-layer implicit iteration finite-difference scheme, computational algorithms, computer ASMPF programs in Visual C++ language (v.6.0) for IBM compatible personal computers were developed, direct numerical investigation was carried out, and for the first time there was established number of regularity the processes and phenomena of hydrodynamics and ablation of melting quartz ceramics in high-temperature supersonic two-phase flows of combustion products of plasmaformation magnesium-based solid combine fuels in the range of parameters, characteristic for gas-dynamics tracts advanced MHD power system. This work was support RFFI's project 98-02-16518.

Керамические материалы, получаемые спеканием порошков неорганических веществ (оксидов, карбидов, нитридов), например, кварцевая керамика [1], широко применяются в качестве внутренней теплозащиты стенок газодинамического тракта и камеры дожигания неохлаждаемых сверхзвуковых импульсных МГД-генераторов (ИМГДГ) на плазмообразующих металлизированных твердых и новых экологически безопасных комбинированных (пиротехнический состав + воздух) топливах. Механизм воздействия высокотемпературных двухфазных потоков продуктов сгорания плазмообразующих топлив на кварцевую керамику заметным образом отличается от ранее известного для аморфных материалов внешней теплозащиты типа стеклообразного плавленного кварца в условиях входа в атмосферу [2] вследствие: различных геометрий течения; полных энтальпий, компонентного состава газа; повышенных давлений; наличия жидких и (или) твердых частиц конденсированной фазы (К-фазы) оксидов металлов и поэтому требует отдельного изучения.

В данной работе представлена новая математическая модель и результаты численного исследования гидродинамики и абляции теплозащиты из пористой оплавливающейся керамики стенок каналов при тчении высокотемпературных сверхзвуковых двухфазных продуктов сгорания плазмообразующих магнлизированных КТ с учетом инерционного осаждения полидисперсных твердых частиц К-фазы оксида магния.

### 1. Математическая модель

В рамках принятых допущений нестационарный прогрев и гидродинамика оплавливающейся пористой кварцевой керамики стенок каналов с привлечением полных уравнений неустановившегося несжимаемого ламинарного пограничного слоя описываются следующей математической моделью в системе координат (x,r), связанной с осью канала:

$$\frac{\partial}{\partial x}(r^k u_L) + \frac{\partial}{\partial r}(r^k v_L) = 0, \quad (1)$$

$$\rho_L \frac{du_L}{dt} = -\frac{\partial p_L}{\partial x} + \frac{1}{r^k} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^k \mu_L \frac{\partial u_L}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\rho_L c_L \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^k} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^k \Lambda_L \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \mu_L \left( \frac{\partial u_L}{\partial r} \right)^2 + u_L \frac{\partial p_L}{\partial x}, \quad (3)$$

$$0 < x \leq L_x, \quad R_w(x, t) < r < R_m(x, t), \quad t_m < t \leq t_a,$$

$$\rho_S c_S \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^k} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^k \Lambda_S \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (4)$$

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту 98-02-16518.

© В.А. Бураков, И.Е. Тимашева, И.В. Щербакова, 2001.

$$0 < x \leq L_x, \quad R_w(x, t) < r < R_m(x, t), \quad t_m < t \leq t_a,$$

$$\rho_L \left( \frac{\partial R_w}{\partial t} - u_{L,w} \frac{\partial R_w}{\partial x} + v_{L,w} \right) = \dot{m}_{ch} + \dot{m}_d, \quad (5)$$

$$P_L = P_e, \quad (6)$$

$$\sum_r \dot{m}_{d,r} H_{d,r} - \mu_L \frac{\partial u_L}{\partial r} \Big|_{R_w+0} = \dot{m}_d u_{L,w} + \tau_w + \tau_p, \quad (7)$$

$$\dot{m}_{ch} H_w + \sum_r \dot{m}_{d,r} H_{d,r} - u_{L,w} \mu_L \frac{\partial u_L}{\partial r} \Big|_{R_w+0} - \Lambda_L \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_w+0} = (\dot{m}_{ch} + \dot{m}_d) H_{L,w} + (\tau_w + \tau_p) u_{L,w} + q_w + q_r + q_p, \quad (8)$$

$$u_{L,m} + v_{L,m} \frac{\partial R_m}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

$$\rho_L \left( \frac{\partial R_m}{\partial t} - u_{L,m} \frac{\partial R_m}{\partial x} + v_{L,m} \right) = \rho_s \frac{\partial R_m}{\partial t}, \quad (10)$$

$$T|_{R_m+0} = T|_{R_m-0} = T|_m, \quad (11)$$

$$0 < x \leq L_x, \quad t_m < t \leq t_a,$$

$$-\Lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_0+0} = q_w + q_r + q_p, \quad (12)$$

$$0 < x \leq L_x, \quad 0 < t \leq t_m,$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_s+0} = 0, \quad (13)$$

$$0 < x \leq L_x, \quad 0 < t \leq t_a,$$

$$\frac{\partial u_L}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (14)$$

$$R_w(0, t) < r < R_m, \quad t_m < t \leq t_a;$$

$$u_L(x, r, t) = 0, \quad 0 \leq t \leq t_m \quad (15)$$

$$T(x, r, 0) = T_{int}, \quad (16)$$

$$0 \leq x \leq L_x, \quad R_0 \leq r \leq R_s$$

где  $u_L, v_L$  - осевая и нормальная составляющие скорости жидкой пленки расплава;  $P, T$  - давление и температура;  $\mu_L$  - коэффициент динамической вязкости диоксида кремния;  $\rho, c, \Lambda$  - плотность, удельная теплоемкость при постоянном давлении и коэффициент кондуктивной теплопроводности;  $H$  - полная энтальпия;  $\dot{m}$  - массовая скорость уноса массы;  $U_{d,r}, H_{d,r}$  - параметры первичного спектра срывааемых при механической эрозии жидкой пленки капель  $r$ -ой фракции;  $R_0, R_s$  - расстояние от оси канала до начального положения внутренней и наружной границ стенок канала;  $L$  - длина канала;  $t_m$  - время достижения температурой поверхности условной температуры плавления;  $t_a$  - время пуска;  $T_{int}$  - начальная температура стенки;  $d/dt$  - полная (субстациональная) производная; Нижние индексы: L - жидкий расплав; S - твердый слой материала, s - наружная граница стенки; w - условия на поверхности нагрева. Верхние индексы  $k=0$  и  $k=1$  соответствуют плоской и осесимметричной задаче.

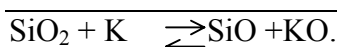
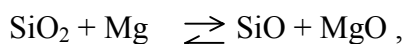
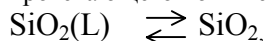
Плотность твердого слоя кварцевой керамики принималась известной функцией пористости, а теплофизические характеристики зависящими от температуры (аналитически или таблично) и пористости [1]. Плотность и теплофизические характеристики жидкого слоя расплава считались постоянными [3]. Коэффициент динамической вязкости расплава диоксида кремния задавался зависящим от температуры по экспоненциальному или степенному закону [2].

Текущее положение фронта плавления кварцевой керамики  $R_m(x,t)$  определяется по изотерме условной температуры плавления. Текущее среднее положение свободной границы жидкой пленки диоксида кремния  $R_w(x,t)$  находится из решения уравнения нестационарной линейной скорости абляции кварцевой керамики за счет механизмов оплавления, парофазного равновесного термохимического разрушения и механической эрозии.

После определения текущих границ фронта плавления и среднего положения свободной границы вычисляется средняя толщина жидкой пленки расплава

$$\Delta_L(x, t) = R_m(x, t) - R_w(x, t).$$

Разработана математическая модель парофазного равновесного термохимического разрушения диоксида кремния в высокотемпературном потоке продуктов сгорания плазмообразующих магнитоизлучающих КТ, протекающего по кинетической схеме:



Уравнения баланса массы элементов, закон сохранения химических элементов, закон действующих масс компонентов, закон Дальтона для компонентов образуют систему нелинейных алгебраических уравнений по определению текущих значений парциальных давлений компонентов (мольных долей), массовых долей элементов, молекулярной массы смеси газов на поверхности и безразмерной массовой скорости термохимического разрушения диоксида кремния. В результате преобразований удаётся получить одно нелинейное алгебраическое уравнение, дающее возможность найти  $V_{ch}$  в функции температуры поверхности, давления и состава газа во внешнем потоке при числе Льюиса – Семёнова равном единице [4,5]. Полученные соотношения для  $V_{ch}$  допускают переход к режиму чистого испарения в инертной атмосфере  $V_{ch} \rightarrow V_v$ , где безразмерная массовая скорость уноса  $V_v$  совпадает с зависимостью [2]. После нахождения  $V_{ch}$  известным путем вычислялась величина размерной массовой скорости термохимического разрушения диоксида кремния.

Из-за сложности процесса, оценка массовой скорости механической эрозии жидкой пленки расплава диоксида кремния за счет срыва капель с гребней волн, свойственной абляционному разрушению некоторых стеклообразных материалов в области повышенных давлений [6], осуществлялась с использованием эмпирической корреляции [7], основанной на экспериментальных данных по динамическому (волновому) уносу жидких пленок при дисперсно – кольцевом режиме двухфазного течения в трубах и каналах.

Средний (медианный) размер первичного спектра срывааемых капель в первом приближении можно оценить с помощью различных полуэмпирических и корреляционных зависимостей, например, по формуле Р.Г. Перельмана [8].

Гидродинамические режимы течения жидкой пленки расплава диоксида кремния определяются критическими числами Рейнольдса пленки. Величина критического числа Рейнольдса пленки  $Re_{L1}^*$ , выше которого наблюдалась потеря устойчивости жидкой пленки расплава и наступал ламинарно-волновой режим течения, находилась из условия, что в этот момент ее толщина равна толщине ламинарного подслоя в турбулентном пограничном слое [9]. Величина критического числа Рейнольдса пленки  $Re_{L2}^*$ , выше которого наступал ламинарно-волновой режим течения жидкого расплава при срыве капель с гребней волн определялась на основе [7].

Следуя общей методологии решения прямых задач абляции, параметры газовой фазы в ядре высокотемпературного сверхзвукового химически равновесного двухфазного течения продуктов сгорания плазмообразующего магнитоизлучающего КТ в канале, включающие распределения по длине давления, плотности, скорости и температуры; массовых потоков, осевых скоростей и температур полидисперсных твердых частиц К-фазы оксида магния при инерционном осаждении на стенку; а также коэффициента трения  $C_{f0}/2$  и числа Стантона  $St_0$  на неподвижной непроницаемой гладкой поверхности, считаются заранее известными. В условиях абляции текущие значения касательного напряжения  $\tau_w$  и конвективного теплового потока  $q_w$  со стороны турбулентного пограничного слоя находятся с учетом поправок в  $C_{f0}/2$  и  $St_0$  на изотермичность, неоднородный вдув, сжимаемость и <<волновую>> шероховатость ( $\Psi_{sh} \neq 1, Re_L > Re_{L1}^*$ ) [10-12]. Дополнительное динамическое и тепловое воздействие осаждающихся инерционно полидисперсных твердых частиц К- фазы оксида магния на свободную поверхность жидкой пленки расплава  $\tau_p$  и  $q_p$ , а также результирующий тепловой поток  $q_r$ , оцениваются по соотношениям [13].

На основе двухслойной неявной итерационной конечно-разностной схемы [14] разработан вычислительный алгоритм и создана версия компьютерной программы ASMTPF на языке Visual C++ (v.6.0) для IBM совместимых ПЭВМ.

## 2. Результаты расчетов

По компьютерной программе ASMPF было проведено параметрическое численное исследование некоторых закономерностей гидродинамики и абляции теплозащиты из типичной плотной кварцевой керамики [1] стенок канала в высокотемпературном сверхзвуковом двухфазном потоке продуктов сгорания плазмообразующего магнизируемого КТ  $0,7\text{Mg} + \text{KNO}_3 + \text{воздух}$  [9,10] при характерном изменении газодинамических параметров по длине и осредненных по массовой доле параметров осаждающихся инерционно монодисперсных твердых частиц К-фазы оксида магния. Время пуска составило 3с.

Результаты расчетов показаны на рис.1-6 с кривыми 1,2,3,4, соответствующим следующим вариантам:

$$\Psi_{\text{ш}} = 1, \quad \dot{m}_{\text{ch}} \neq 0, \quad \dot{m}_{\text{d}} = 0, \quad \tau_p = q_p = 0;$$

$$\Psi_{\text{ш}} \neq 1, \quad \dot{m}_{\text{ch}} \neq 0, \quad \dot{m}_{\text{d}} = 0, \quad \tau_p = q_p = 0;$$

$$\Psi_{\text{ш}} \neq 1, \quad \dot{m}_{\text{ch}} \neq 0, \quad \dot{m}_{\text{d}} = 0, \quad \tau_p = q_p = 0;$$

$$\Psi_{\text{ш}} \neq 1, \quad \dot{m}_{\text{ch}} \neq 0, \quad \dot{m}_{\text{d}} \neq 0, \quad \tau_p \neq q_p \neq 0;$$

Получено, что по сравнению с минимальной абляцией кварцевой керамики, отвечающей механизмам уноса массы за счет оплавления и термохимического разрушения, наличие «волновой» шероховатости и механической эрозии приводит к возрастанию массовой скорости термохимического разрушения в 2.85 раза, толщины унесенного слоя материала в 16.3 раза, скорости движения поверхности жидкой пленки расплава в 1.37 раза, тогда как ее толщина уменьшалась всего на 8.5%, а средний диаметр срывааемых капель снижался с 22.84 до 21.93 мкм. Важнейшим механизмом уноса массы кварцевой керамики здесь является механическая эрозия жидкой пленки расплава, массовая скорость которой примерно на порядок превышает скорость парофазного равновесного термохимического разрушения. Эффект неоднородности т.е. динамического и теплового воздействия осаждающихся инерционно твердых частиц К-фазы оксида магния вызывает увеличение массовой скорости термохимического разрушения в 1.55 раза, массовой скорости механической эрозии в 2.71 раза, толщины унесенного слоя материала в 3.84 раза, скорости движения поверхности жидкой пленки расплава в 3.08 раза. При этом толщина пленки уменьшалась на 27.5%, а средний диаметр срывааемых капель составлял 18.67мкм. Установлено также качественное изменение зависимости толщины жидкой пленки расплава кварцевой керамики от безразмерной осевой координаты по сравнению с вариантами

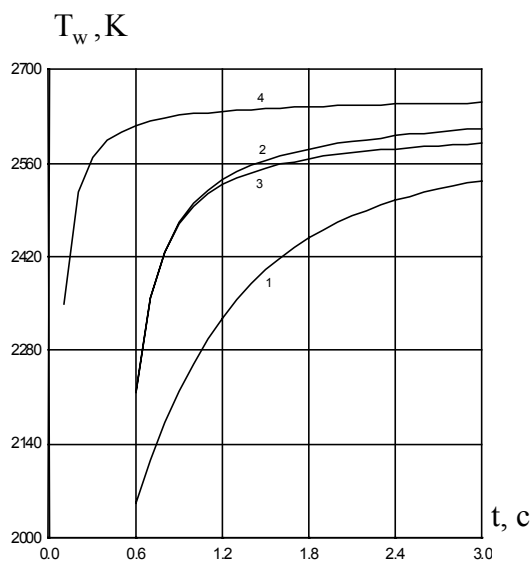


Рис. 1.

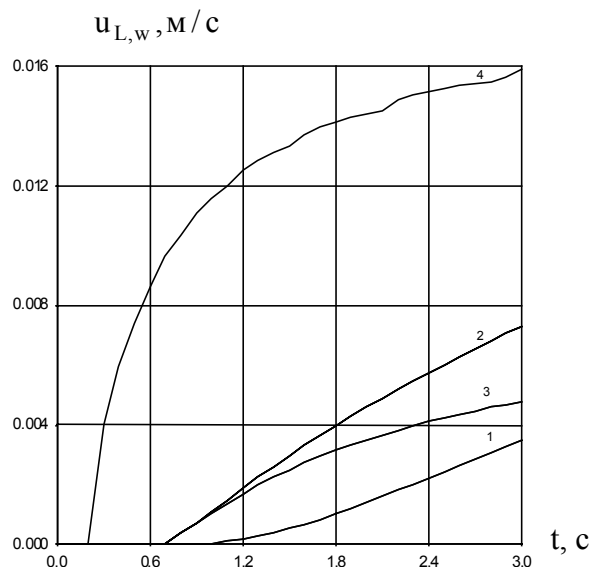


Рис. 2.

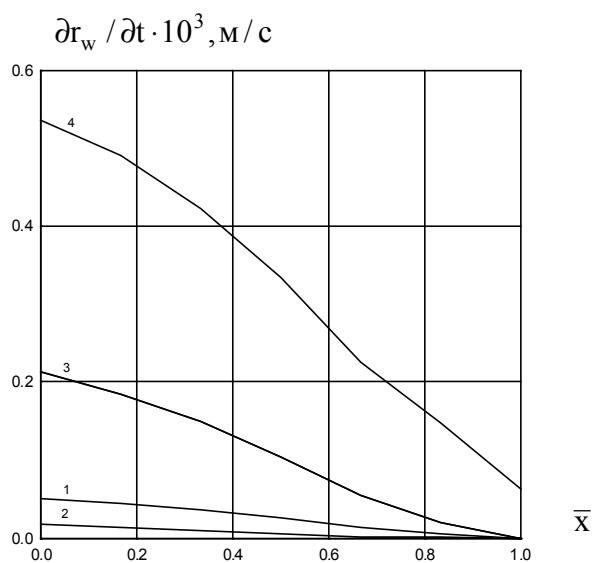


Рис.3.

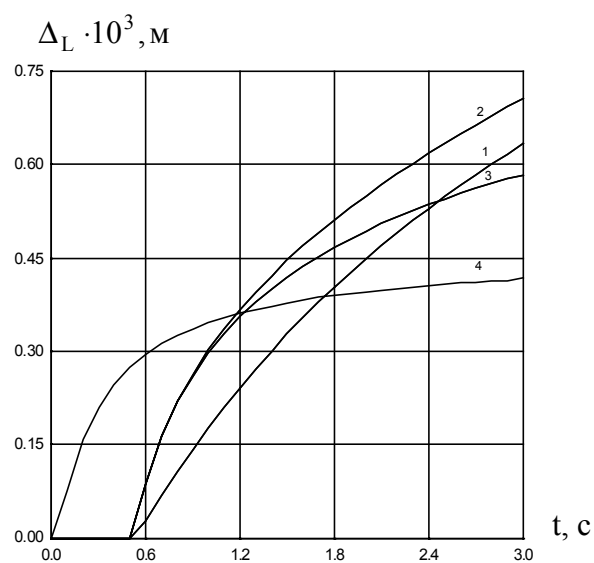


Рис. 4.

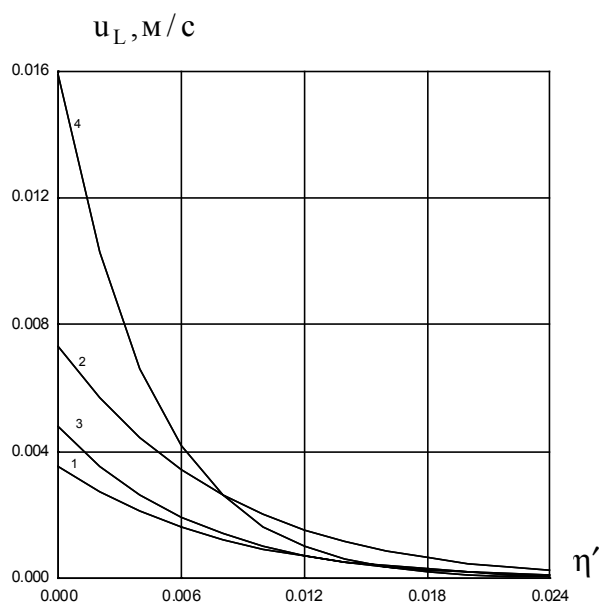


Рис.5.

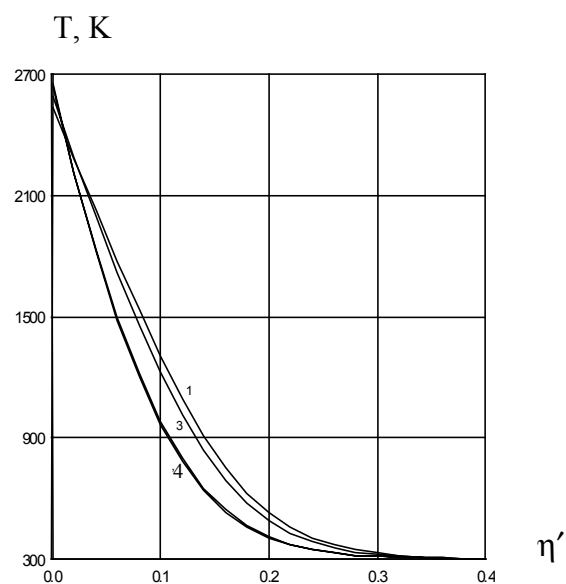


Рис. 6.

расчетов, не учитывающими воздействие твердых частиц К-фазы. В опорном расчете число Рейнольдса пленки изменялось в диапазоне 36,35...44,18. Выявлено, что профили температур в кварцевой керамике от безразмерной нормальной координаты более консервативны к принятым в расчетах предположениям, чем профили скоростей, а толщина жидкой пленки расплава примерно на порядок меньше глубины прогрева.

## Список литературы

- [1] Пивинский Ю.В., Ромашин А.Г. Кварцевая керамика. М.: Металлургия, 1974. 220с.
- [2] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392с.

- [3] Панкратов Б.М., Алифанов О.М., Иванов А.А., Маркин А.Д. Нестационарный нагрев разрушение теплозащитных материалов. Тепло-и массоперенос. Минск, т.2,1972, С.309-319.
- [4] Бураков В.А., Тимашева И.Е. Математическое моделирование абляции кварцевой керамики в высокотемпературных потоках продуктов сгорания плазмообразующих комбинированных топлив// Исследования по баллистике и смежным вопросам механики. Сб. статей. Вып.2. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. С. 64 – 69.
- [5] Бураков В.А., Панченко В.П., Тимашева И.Е., Щербакова И.В., Якушев А.А. Модель нестационарной абляции стенок цилиндрического канала из кварцевой керамики при течении продуктов сгорания плазмообразующего комбинированного топлива //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. С.133-134.
- [6] Грейвс. Абляция в условиях больших касательных напряжений // Ракетная техника и космонавтика, 1966. Т.4, №5, С.109-116.
- [7] Ивандаев С.И. Закономерности влагообменных процессов при течении двухфазных смесей в дисперсно – кольцевом режиме // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1986. №4, вып.1.С.93-102.
- [8] Перельман Р.Г. Устойчивость жидкой пленки расплава, обдуваемой газом с одной стороны, и размеры капель при ее дроблении. Изв. вузов. Авиационная техника. 1972. №1. С.149-154.
- [9] Jshll M.,Grolmes M.A. Inception criteria for droplet entrainment in two – phase concurrent film flow // AIChE,1975. Vol.21, №2. P.308-317.
- [10] Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоиздат, 1985. 344с.
- [11] Фролов С.М., Гельфанд Б.Е., Тимофеев Е.И. Взаимодействие пленки жидкости с высокоскоростным газовым потоком за ударной волной // Физика горения взрыва, 1984. Т.20, №5. С.107-114.
- [12] Неслер. Теплопередача в сжимаемом турбулентном пограничном слое на шероховатой поверхности // Ракетная техника и космонавтика, 1971. Т.9, №9. С.166-171.
- [13] Бураков В.А. Теплообмен при взаимодействии двухфазных потоков с материалами. Томск: Изд-во ТГУ, 1999. 280с.
- [14] Андерсон Д., Таннехил Дж., Флетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т.2. М.: Мир, 1990. 392с.