УДК 539.3

A.H. ИЩЕНКО $^{I}$ , P.H. АКИНШИН $^{3}$ , C.A. АФАНАСЬЕВА $^{I}$ , H.H. БЕЛОВ $^{I}$ , И.Л. БОРИСЕНКОВ $^{3}$ , B.B. БУРКИН $^{I}$ , A.H. ТАБАЧЕНКО $^{I}$ , A.B. ХАБИБУЛЛИН $^{I}$ , H.T. ЮГОВ $^{I}$ 

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОРИСТОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА С УПРОЧНЯЮЩИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ\*

Исследовано поведение металлокерамического пористого сплава на основе вольфрама с упрочняющими наполнителями при ударно-волновом нагружении. Расчетно-экспериментальным методом исследована проникающая способность кинетических ударников из вышеназванных сплавов в стальные плиты при высокоскоростном соударении. Установлено увеличение глубины проникания ударников, превышающее массогабаритный аналог из монолитного сплава вольфрам+никель+железо. Разработана математическая модель и методика расчета поведения пористых сплавов системы вольфрам+никель+железо+кобальт (ВНЖК), легированных карбидом бора  $B_4C$ , карбидом титана – вольфрама TiWC и карбидом вольфрама WC, в условиях высокоскоростного взаимодействия. Композиционный металлокерамический материал описывается как пористая среда, матрица которой представляет собой гомогенную двухфазную смесь BHЖK и наполнителей в соответствующих концентрациях.

**Ключевые слова:** композиционный металлокерамический материал, наполнитель, пористость, эксперимент, математическое моделирование, высокоскоростной удар, глубина проникания.

#### Ввеление

Высокопрочные и высокоплотные сплавы на основе вольфрама с 3*d*-переходными металлами активно используются в различных областях высокоскоростного взаимодействия твердых тел. Ударники из них по своим физико-механическим характеристикам выгодно отличаются от остальных: они имеют большую плотность, высокую твердость, более высокий модуль упругости и т.д. Считается, что материал с такими характеристиками должен обладать и повышенной проникающей способностью при ударном взаимодействии. Одним из основных направлений повышения проникающей способности кинетических ударников в металлические преграды является использование материалов с более совершенным комплексом физико-механических свойств для их изготовления. Наряду с высокопрочными и высокоплотными сплавами на основе вольфрама, обладающими повышенной проникающей способностью при ударном взаимодействии, определенный интерес представляют пористые ударники на этой же основе. Методом высокотемпературного спекания разрабатываются пористые сплавы на основе вольфрама с 3*d*-переходными металлами, а улучшение прочностных характеристик возможно путем легирования высокотвердыми тугоплавкими соединениями [1, 2]. Исследуемые металлокерамические материалы представляют собой пористые сплавы на основе системы ВНЖК с упрочняющим наполнителем: карбидом бора В<sub>4</sub>С, карбидом титана – вольфрама TiWC и карбидом вольфрама WC.

Дальнейшие исследования физических явлений, происходящих при высокоскоростном соударении высокопористых ударников, упрочненных путем легирования высокотвердыми тугоплавкими соединениями, наряду с экспериментальными исследованиями нуждаются в адекватных математических моделях, описывающих сложные процессы взаимодействия. Настоящая работа направлена на исследование физики и механики конденсированного состояния композиционных материалов со сложной структурой, в частности пористого сплава на основе вольфрама с упрочняющим наполнителем со сложной структурой, расчетно-экспериментальным методом в условиях динамического нагружения. Для этой цели разработана математическая модель и методика расчета высокоскоростного взаимодействия в рамках пористой упругопластической среды с учетом различных механизмов разрушения композиционных материалов [3]. Экспериментальные исследования проведены с применением баллистического комплекса на основе ствольно-реактивной

 $<sup>^*</sup>$  В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

технологии метания [4], позволяющего разгонять ударники массой 30–200 г в диапазоне скоростей до 3 км/с при постепенном нарастании нагрузки в канале ствола.

## Результаты экспериментально-теоретических исследований

Теоретические исследования проведены в рамках математической модели сплошной среды. Пористые металлокерамические материалы на основе системы ВНЖК с упрочняющим наполнителем описывается как пористая среда, матрица которой представляет собой гомогенную двухфазную смесь ВНЖК и наполнителей в соответствующих концентрациях.

В свою очередь, пористая среда рассматривается как двухкомпонентный композиционный материал, состоящий из твердой фазы – матрицы (ВНЖК + наполнитель) и включений – пор. Считается, что материал матрицы однороден и изотропен, а поры распределены в нем равномерно по всем направлениям.

Удельный объем пористой среды  $\upsilon$  представляется в виде суммы удельного объема пор  $\upsilon_p$  и удельного объема матрицы  $\upsilon_m$ :  $\upsilon = \upsilon_p + \upsilon_m$ . Пористость материала характеризуется объемом пус-

тот в единице объема  $\xi = \frac{\upsilon_p}{\upsilon}$  либо параметром  $\alpha = \frac{\upsilon}{\upsilon_m}$ , которые связаны очевидными зависимо-

стями  $\alpha = \frac{1}{1-\xi}$ ,  $\xi = 1 - \frac{1}{\alpha}$ . Здесь и далее индексом *m* обозначены параметры матрицы.

При этих предположениях система уравнений, описывающих движение пористой упругопластической среды, имеет вид

$$\frac{d}{dt}\int_{V}\rho dV=0\,,\quad \frac{d}{dt}\int_{V}\rho \textbf{\textit{u}}dV=\int_{\Sigma}\textbf{\textit{n}}\boldsymbol{\sigma}dS\,,\quad \frac{d}{dt}\int_{V}\rho EdV=\int_{\Sigma}\textbf{\textit{n}}\boldsymbol{\sigma}\textbf{\textit{u}}dS\,,\quad \textbf{\textit{e}}=\frac{\textbf{\textit{s}}^{CR}}{2\mu}+\lambda\textbf{\textit{s}}\,,\quad \textbf{\textit{s}}:\textbf{\textit{s}}=\frac{2}{3}\sigma_{\text{\tiny T}}^{2}\,,$$
 где  $t$  – время;  $V$  – объем интегрирования;  $\Sigma$  – поверхность объема интегрирования;  $\textbf{\textit{s}}^{CR}=\frac{d\textbf{\textit{s}}}{dt}+\nabla \textbf{\textit{u}}\textbf{\textit{s}}+\textbf{\textit{s}}\nabla \textbf{\textit{u}}^{T}$  – коротационная производная девиатора тензора напряжений Коттер и Ривлина;  $\textbf{\textit{n}}$  – единичный вектор внешней нормали;  $\rho$  – плотность;  $\boldsymbol{\sigma}=-p\textbf{\textit{g}}+\textbf{\textit{s}}$  – тензор напряжений;  $\textbf{\textit{s}}$  – девиатор тензора напряжений;  $p$  – давление;  $\textbf{\textit{g}}$  – метрический тензор;  $\textbf{\textit{u}}$  – вектор скорости;  $E=\varepsilon+\textbf{\textit{u}}\textbf{\textit{u}}/2$  – удельная полная энергия;  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\textbf{\textit{d}}=\left(\nabla \textbf{\textit{u}}+\nabla \textbf{\textit{u}}^{T}\right)/2$  – тензор скоростей деформаций;  $\textbf{\textit{e}}=\textbf{\textit{d}}-(\textbf{\textit{d}}:\textbf{\textit{g}})\textbf{\textit{g}}/3$  – девиатор тензора скоростей деформаций;  $\mu=\mu_{m0}\left(1-\xi\right)\left[1-\left(6\rho_{m0}c_{m0}^{2}+12\mu_{m0}\right)\xi/\left(9\rho_{m0}c_{m0}^{2}+8\mu_{m0}\right)\right]$  – эффективный модуль сдвига;  $\sigma_{\text{T}}=\sigma_{mS}/\alpha$  – эффективный предел текучести;  $\rho_{m0}$ ,  $c_{m0}$ ,  $\mu_{m0}$ ,  $\sigma_{mS}$  – начальные плотность, объемная скорость звука, модуль сдвига и динамический предел текучести материала матрицы. Параметр  $\lambda$  исключается с помощью условия пластичности Мизеса.

Термодинамическое уравнение состояния пористого материала зависит от  $\alpha$ :

$$p = \frac{p_m(\alpha \rho, \varepsilon)}{\alpha},$$

где  $\rho = \frac{\rho_m}{\alpha}$  — плотность пористого материала;  $\rho_m$  — плотность материала матрицы.

При линейной зависимости скорости ударной волны от массовой скорости u на ударной адиабате  $D=c_{m0}+S_{m0}u$ , которая выполняется для многих конструкционных материалов, уравнение состояния выбрано в виде

$$p = \frac{\rho_{m0}}{\alpha} \left[ \gamma_{m0} \varepsilon + \frac{c_{m0}^2 \left( 1 - \frac{\gamma_{m0}}{2} \right) \eta}{\left( 1 - S_{m0} \eta \right)^2} \right],$$

где  $\eta = 1 - \rho_{m0} \frac{\upsilon}{\alpha}$ ;  $\gamma_{m0}$  – коэффициент Грюнайзена.

Эволюция пор при динамическом нагружении описывается уравнениями, связывающими давление p и пористость  $\alpha$  в диапазоне  $1 < \alpha_{00} < \alpha \le \alpha^*$ :

- при сжатии

$$\frac{\rho_{m0}c_{m0}^{2}\left(1-\frac{\gamma_{m0}}{2}\eta\right)\eta}{\left(1-S_{m0}\eta\right)^{2}}+\rho_{m0}\gamma_{m0}\varepsilon-\frac{2}{3}\sigma_{s}\ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right)=0,$$

когда 
$$p \ge \frac{2}{3}\sigma_{\scriptscriptstyle \rm T} \ln\!\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right)$$
, иначе  $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ ,

- при разгрузке

$$\frac{\rho_{m0}c_{m0}^{2}\left(1-\frac{\gamma_{m0}}{2}\eta\right)\eta}{\left(1-S_{m0}\eta\right)^{2}}+\rho_{m0}\gamma_{m0}\varepsilon+a_{s}\ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right)=0,$$

когда 
$$p \le -\frac{a_s}{\alpha} \ln \left( \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)$$
, иначе  $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ , где  $a_S = \frac{2}{3} \sigma_{_T}$ ;  $\alpha_{00}$  – остаточная пористость в материале,

которая не может быть устранена предварительным сжатием материала;  $\alpha^*$  – пористость, при которой происходит разрушение материала.

Параметры модели матрицы композиционного материала с наполнителем определяются как параметры гомогенной двухфазной смеси по соответствующим параметрам компонент.

Начальная плотность материала матрицы  $\rho_{m0}$  определяется по формуле  $\rho_{m0} = \nu_1 \rho_{1m0} + \nu_2 \rho_{2m0}$ , где  $\rho_{im0}$  и  $\nu_i$  – начальные плотности и объемные концентрации ВНЖК (i = 1) и наполнителя (i = 2),

причем 
$$v_1+v_2=1$$
, либо  $\rho_{m0}=\frac{\rho_{m1}\rho_{m2}}{m_1\rho_{m2}+m_2\rho_{m1}}$ , где  $m_i=\frac{v_i\rho_{m0i}}{\rho_{m0}}$  — массовая концентрация  $i$ -ком-

понента смеси  $(m_1+m_2=1)$ . Начальная плотность  $\rho_0$  пористого композиционного материала с различным содержанием наполнителя меняется в зависимости от доли наполнителя и объема пустот  $\xi_0=1-\rho_0/\rho_{\rm m0}$ .

Параметры уравнения состояния  $c_{m0}$  и S определяются через ударные адиабаты компонент смеси  $D_i = c_{m0i} + S_{m0i}u$ . В переменных удельный объем  $v_m$  — давление  $p_m$  ударная адиабата имеет следующий вид:

$$\upsilon_{m}(p_{m}) = \sum_{i=1}^{2} m_{i} \left\{ \upsilon_{m0i} - \frac{1}{p_{mi}} \left[ \frac{c_{m0i}}{S_{m0i}} \left( \sqrt{\frac{p_{m}S_{m0i}}{\rho_{m0i}c_{m0}^{2}} + \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \right) \right]^{2} \right\},\,$$

где  $\upsilon_{m0i} = \frac{1}{\rho_{m0i}}$ . Для определения коэффициентов  $c_{m0}$  и  $S_{m0}$  смеси строятся зависимости скорости ударной волны D от массовой скорости:

$$D = \upsilon_{m0} \sqrt{\frac{p_m}{\upsilon_{m0} - \upsilon_m(p_m)}}, \ u = \sqrt{p_m(\upsilon_{m0} - \upsilon_m(p_m))},$$

где 
$$v_{m0} = \frac{1}{\rho_{m0}}$$
.

Коэффициент Грюнайзена  $\gamma_{m0}$  определяется через коэффициенты компонент смеси:

$$\gamma_{m0} = \frac{v_{m0}}{\sum_{i=1}^{2} \frac{m_i}{\rho_{mi0}\gamma_{m0i}}}.$$

Модуль сдвига смесевого композиционного материала определяются через модули сдвига его компонент:

$$\mu_{m0} = \frac{1}{\frac{\nu_1}{\mu_{m01}} + \frac{\nu_2}{\mu_{m02}}} \,.$$

Предел текучести определяется через пределы текучести компонент  $\sigma_{ms} = m_1 \sigma_{ms1} + m_2 \sigma_{ms2}$ .

Моделирование разрушения материала учитывает критерии отрывного и сдвигового разрушения. Отрывное разрушение композиционного материала при ударно-волновом нагружении рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов, образующихся при растяжении. Локальным критерием является предельная величина относительного объема пустот  $\xi^* = 1 - \frac{1}{\alpha^*}$ .

В качестве критерия сдвигового разрушения используется предельное значение удельной работы пластических деформаций  $A_*^p$ , приращение которой в единице объема вычисляется по фор-

муле 
$$dA^p = \frac{\sigma_{_{\rm T}}}{3\mu} \left( \sqrt{\frac{3}{2}s \cdot s} - \sigma_{_{\rm T}} \right)$$
, либо величина предельной интенсивности пластической деформа-

ции 
$$e_u^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}$$
, где  $T_1, T_2$  — первый и второй инварианты тензора пластических деформаций.

Разрушенный материал моделируется упругопластической средой, выдерживающей сжимающие нагрузки, но не выдерживающие растягивающих напряжений.

Данная математическая модель реализована с помощью программных комплексов [5, 6].

## Результаты экспериментально-теоретических исследований

В табл. 1 приведены параметры математической модели динамического нагружения матрицы пористого сплава на основе сплава ВНЖК с упрочняющими наполнителями: карбидом бора  $B_4C$ , карбидом титана – вольфрама TiWC и карбидом вольфрама WC.

Таблица 1 Параметры математической модели пористых композиционных материалов на основе ВНЖК с наполнителями

| Материал | $\rho_{m0}$ | $m_1$ | $m_2$ | $c_{m0}$ , cm/mkc | $S_{m0}$ | $\mu_{m0}$ , ГПа | σms, ΓΠ $a$ | $\gamma_{m0}$ | $a_{\rm s}$ , ГПа | $\alpha_{00}$ | $e_u^*$ | *   |
|----------|-------------|-------|-------|-------------------|----------|------------------|-------------|---------------|-------------------|---------------|---------|-----|
| ВНЖК+В4С | 14.98       | 0.975 | 0.025 | 0.415             | 1.36     | 141.7            | 1.570       | 1.579         | 1.046             | 1.0008        | 1.0     | 0.3 |
| ВНЖК+ТWC | 16.23       | 0.9   | 0.1   | 0.420             | 1.17     | 144.73           | 1.464       | 1.610         | 0.976             | 1.0008        | 1.0     | 0.3 |
| ВНЖК+WС  | 16.88       | 0.9   | 0.1   | 0.405             | 1.34     | 141.56           | 1.494       | 1.636         | 0.993             | 1.0008        | 1.0     | 0.3 |

Для верификации математической модели динамического нагружения пористого сплава на основе вольфрама с упрочняющими наполнителями проведены экспериментальное исследование и математическое моделирование соударения образцов композиционных материалов: сплава ВНЖК + В<sub>4</sub>С, ВНЖК + ТWС и ВНЖК + WC со стальной преградой толщиной 86 мм с близкими скоростями удара  $V_0$ . Изготовлены ударники равной массы  $m_0 = 30$  г и диаметра  $d_0 = 9$  мм. В связи с различной начальной плотностью  $\rho_0$  ударники имеют различную длину  $l_0$ . В табл. 2 приведена глубина проникания h и относительная разница  $\Delta$  с глубиной проникания ударника из монолитного сплава ВНЖ-90. Во всех случаях ударники из пористого композиционного материала превосходят ударник из монолитного сплава ВНЖ-90 по глубине проникания.

Таблица 2 Результаты баллистических испытаний

| Образец   | $ρ_0$ , $Γ/c M^3$ | $l_0$ , mm | V <sub>0</sub> , м/с | <i>h</i> , мм | Δ, % |
|-----------|-------------------|------------|----------------------|---------------|------|
| ВНЖК+В4С  | 14.81             | 31.8       | 2740                 | 54.83         | 11   |
| ВНЖК+ТiWC | 11.72             | 48.14      | 2817                 | 65.02         | 32   |
| ВНЖК+WС   | 16.39             | 29         | 2817                 | 49.78         | 1.2  |
| ВНЖ-90    | 17.1              | 28.75      | 2817                 | 49.2          |      |

На рис. 1–3 приведены данные математического моделирования в виде хронограмм проникания ударников в преграду, а также вид лицевой поверхности стальной преградаы с видом кратера. Расчеты проведены до полной остановки процесса проникания. Ударники разрушаются, образуя кратер. Глубина кратера от удара образца ВНЖК+ $B_4$ С в расчете составляет 57.6 мм, расхождение с экспериментом – 5 %. Глубина кратера от удара образца ВНЖК+TiWC в расчете – 68.13 мм, расхождение с экспериментом – 5 %. Глубина кратера от удара образца ВНЖК+WC в расчете – 53.82 мм, расхождение с экспериментом – 8 %. В эксперимента на дне кратера обнаружен порошок от разрушившегося ударника.

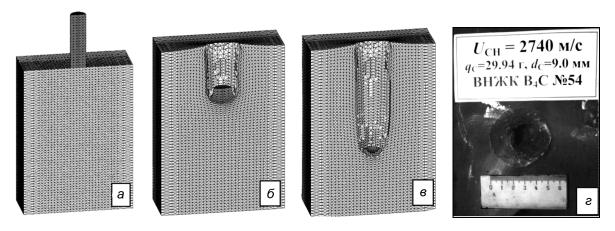


Рис. 1. Хронограмма проникания в преграду ударников из композита ВНЖК +  $B_4$ С и вид кратера после соударения при  $V_0 = 2740$  м/с: a - t = 0 мкс; 6 - t = 20 мкс; 6 -

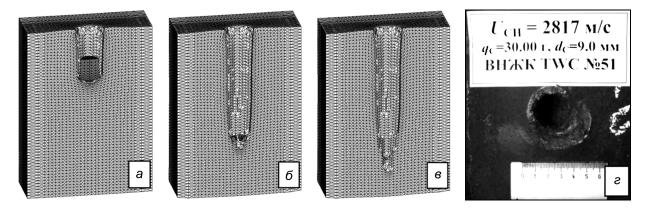


Рис. 2. Хронограмма проникания в преграду ударников из композита ВНЖК + TiWC и вид кратера после соударения  $V_0=2810$  м/с: a-t=20 мкс; b-t=60 мкс; b-t=90 мкс; b

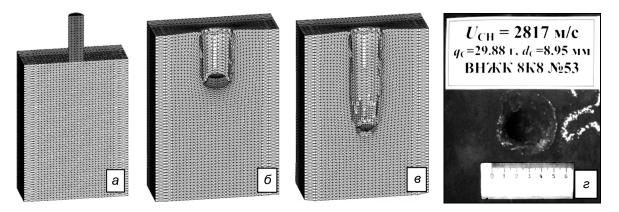


Рис. 3. Хронограмма проникания в преграду ударников из композита ВНЖК + WC и вид кратера после соударения  $V_0 = 2817$  м/с: a - t = 0 мкс; 6 - t = 20 мкс; 6 - t = 78 мкс; 2 - 60 мкс; 3 -

На рис. 4 приведены результаты прогнозных расчетов глубины проникания в полубесконечную стальную преграду ударников из композитов ВНЖК + WC при различном содержании компонент (массовое содержание WC в %): кр. *I* (♦) − ВНЖК + 10 % WC; кр. *2* (■) − ВНЖК + + 30 % WC; кр. *3* (▲) − ВНЖК + 70 % WC в сравнении с ударником из ВНЖ-90 − кр. *4* (●). Значками показаны экспериментальные результаты. Наблюдается тенденция роста глубины проникания ударников при увеличении скорости соударения. В диапазоне от 1 до 1.5 км/с результаты проникания близки для всех ударников. С увеличением скорости удара от 2 до 3 км/с наблюдается тенденция роста глубины проникания ударников из композитов ВНЖК+WC при увеличении содержания последнего. Во всех рассмотренных вариантах ударники из композита проникают глубже, чем ударники из ВНЖ-90.

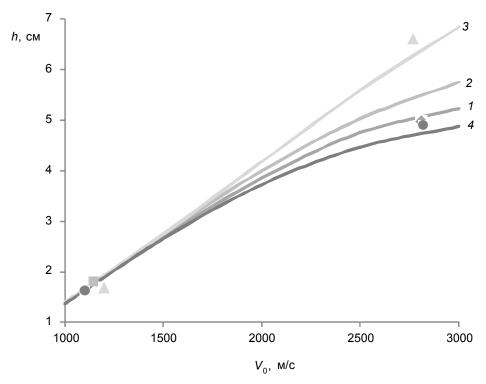


Рис. 4. Зависимость глубины проникания в стальную преграду ударников из композитов ВНЖК+WC от скорости удара

### Заключение

Расчетно-экспериментальным методом проведено исследование поведения металлокерамических материалов, представляющих собой пористые сплавы на основе системы ВНЖК с упрочняющими наполнителями  $B_4C$ , TiWC и WC в составе кинетических ударников, при высокоскоростном соударении со стальными преградами. Исследована проникающая способность кинетических ударников из вышеназванных сплавов.

Показано преимущество кинетических ударников из вышеназванных сплавов по глубине проникания в стальную преграду по сравнению массогабаритным аналогом из монолитного сплава ВНЖ-90 в диапазоне скоростей 2–3 км/с.

Разработана математическая модель в рамках пористой упругопластической среды, описывающая поведение пористых металлокерамических материалов на основе сплава ВНЖК с упрочняющими наполнителями: карбидом бора  $B_4C$ , карбидом титана — вольфрама TiWC и карбидом вольфрама WC при динамическом нагружении. Пористые металлокерамические материалы описываются с помощью модели гомогенной смеси компонент в соответствующих пропорциях. Проведена верификация математической модели с помощью баллистических испытаний при соударении образцов из пористых металлокерамических материалов со стальной массивной пластиной. Наблюдается удовлетворительное согласование экспериментальных данных и результатов математического моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Белов Н.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 17. С. 41—47.
- 2. Ищенко А.Н., Табаченко А.Н., Афанасьева С.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. — № 10. — С. 146—152.
- 3. Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремова Л.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 1992. Т. 35. № 8. С. 5—48.
- 4. Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н. и др. Экспериментальный баллистический комплекс // Патент на изобретение № 2591132 от 20 июня 2016 г.
- 5. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестандартных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3) / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам // Свид. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2010611042. М., 2010.
- 6. Хабибуллин М.В., Афанасьева С.А. Расчет явлений, происходящих в конденсированных средах в результате интенсивных импульсных воздействий, в осесимметричной постановке / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам // Свид. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012617301. М., 2012.

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск, Россия <sup>2</sup> Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова Томского государственного университета, г. Томск, Россия <sup>3</sup> Секция по оборонным проблемам Министерства обороны (при Президиуме РАН), г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 19.02.18, после доработки – 04.04.18.

Ищенко Александр Николаевич, д.ф.-м.н., зам. директора, e-mail: ichan@niipmm.tsu.ru;

**Акиншин** Руслан Николаевич, д.т.н., ведущ. науч. сотр., e-mail: rakinshin@yandex.ru;

**Афанасьева** Светлана Ахмед-Рызовна, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр., ведущ. науч. сотр., е-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru;

**Белов** Николай Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, ведущ. науч. сотр., e-mail: n.n.belov@mail.ru;

**Борисенков** Игорь Леонидович, к.т.н., зам. председателя, e-mail: borisenkov46@yandex.ru;

**Буркин** Виктор Владимирович, к.ф.-м.н., зав. сектором, e-mail: v.v.burkin@mail.ru;

Табаченко Анатолий Никитович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., ведущ. науч. сотр.;

Хабибуллин Марат Варисович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр., ведущ. науч. сотр.;

**Югов** Николай Тихонович, д.ф.-м.н., профессор, ведущ. науч. сотр., e-mail: n.t.yugov@mail.ru.