



УДК 621.455

В. И. Пегов, И. Ю. Мошкин, Е. С. Меркулов, А. Д. Чешко

## Численное моделирование гидродинамических нагрузок на стартующую ракету и подводную лодку

Приведено решение задачи определения гидродинамических нагрузок на ракету и подводную лодку с помощью численного моделирования на базе метода контрольного объема в трехмерной нестационарной постановке с учетом обводов, скоростей ракеты и подводной лодки, двухфазности (газ – жидкость), вязкости и силы тяжести среды. Рассчитано стартовое воздействие на ракету и подводную лодку для двух случаев: с ходом и без хода лодки. Надежность и достоверность расчетов подтверждены их сравнением с результатами испытаний на модели в гидробассейне АО «ГРЦ Макеева».

**Ключевые слова:** подводный старт, газовый пузырь, гидродинамика, моделирование.

При старте ракеты с подводной лодки возникают значительные по величине гидродинамические нагрузки, поэтому прочность корпуса и систему стабилизации ракеты и подводной лодки выбирают, исходя из этих нагрузок. Современные численные методы позволяют в более полной постановке и с более высокой точностью решать одновременно две взаимосвязанные гидродинамические задачи: для стартующей ракеты и ее носителя, подводной лодки.

Для решения гидрогазодинамической задачи старта ракеты с подводной лодки применим метод контрольного объема (МКО) [1, 2], в основе которого лежат уравнения сохранения. Обобщенная форма записи уравнений сохранения имеет при этом следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \Phi d\Omega + \int_S \rho \Phi (\mathbf{Vn}) dS = \\ = \int_S \Gamma (\text{grad} \Phi \mathbf{n}) dS + Q(p, F_m), \end{aligned} \quad (1)$$

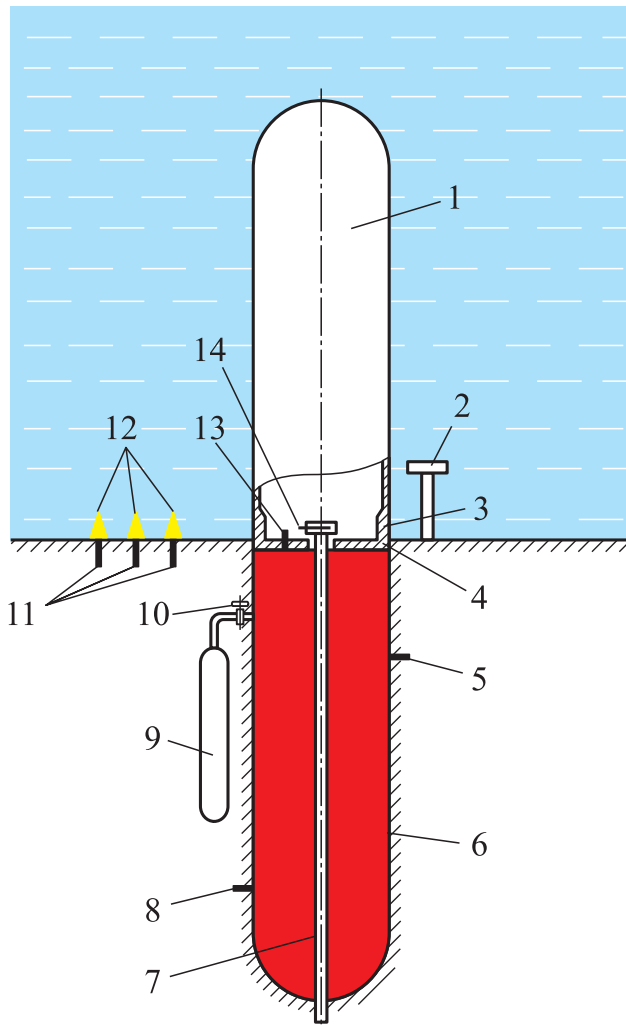
где в левой части находятся нестационарный и конвективный члены, в правой – диффузионный и источниковый. Здесь также обозначены  $\Phi$  – произвольная величина, значение которой зависит от рассматриваемого уравнения (например, в уравнении движения  $\Phi \equiv V$ , уравнении энергии  $\Phi = c_p T$ );  $\Gamma$  – коэффициент диффузии для величины  $\Phi$ ;  $Q(p, F_m)$  – источниковый член, который может содержать составляющие как от массовых сил, так и от перепада давления.

Поскольку скорость движения воды при старте намного меньше скорости распространения звуковых волн в воде, движущуюся воду будем считать несжимаемой.

Моделирование было проведено в нестационарной трехмерной постановке с учетом многофазности среды и наличия силы тяжести, при этом была использована реализация МКО на базе комплекса *ANSYS Fluent* [3]. Замыкание системы уравнений было осуществлено с использованием двухпараметрической модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$ . Для описания межфазового взаимодействия применена модель *VOF* (*Volume Of Fluid*) [4].

Межфазовое взаимодействие учитывается посредством однородной модели Эйлера и модели свободной поверхности – данная комбинация используется для течений с ярко выраженной свободной поверхностью раздела фаз. Эти модели напрямую разрешают поверхность раздела между фазами, помещая в нее специальное граничное условие. Решается один набор уравнений для каждой из фаз (воды и газа) и отдельно рассчитывается граница взаимодействия этих фаз. Надежность и достоверность разработанного численного метода подтверждает сравнение расчетных данных с экспериментальными, проведенными в гидробассейне на установке (рис. 1.)

Перед пуском модельный комплекс размещают на донной тележке, которая может перемещаться с заданной скоростью по рельсам, проложенным по дну бассейна. Требуемое по методике моделирования гидростатическое давление задается высотой столба воды в гидробассейне. При испытаниях были проведены измерения скорости модели 1 индуктивным



**Рис. 1.** Схема модельной установки:

1 – модель; 2 – индуктивный датчик скорости; 3 – пиропатрон; 4 – obtюратор; 5, 8, 11, 13 – датчики давления; 6 – шахта; 7 – центральная тяга; 9 – аккумулятор давления; 10 – электроклапан; 12 – датчики сплошности среды; 14 – фиксатор

датчиком скорости 2, давления – датчиками давления 5, 8 в шахте, на днище модели 13 и в окружающей жидкости 11, сплошности среды – датчиками сплошности среды 12, для визуализации процессов – скоростная кинорегистрация (300 кадр/с). Перед пуском модели 1 с помощью открытия электроклапана 10 аккумулятора давления 9 шахтный объем 6 заполняется воздухом, давление в котором достигается больше гидростатического. Модель при этом удерживает центральная тяга 7. Пуск модели происходит по команде – при срабатывании пиропатрона 3 и освобождения центральной тяги.

В момент выхода кормы модели ракеты из шахты скорость ее вертикального движения достигала 8,5 м/с, а давление воздуха за ее

дном при этом в 2,3 раза превышало гидростатическое давление  $p_{\infty}$  на уровне среза шахты. С этого момента начинается интенсивное истечение газа в окружающую жидкость и быстрый рост объема образующегося у среза шахты газового пузыря, форма которого близка к полусферической. Разгерметизация шахты и эволюция пузыря сопровождаются колебаниями давления в окружающей жидкости.

При численном моделировании возможно более детально изучить физическую картину процессов. В частности, можно представить результаты расчетов в виде видеogramм, где наглядно прослеживается эволюция образующихся газовых полостей. На рис. 2 приведено сравнение расчетной видеogramмы протекающих процессов с результатами киносъемки, полученной при испытаниях модели. Получено хорошее соответствие формы и размеров газового пузыря.

Развитие газового пузыря начинается в момент выхода кормы модели из шахты, когда давление газов в шахте избыточное, и струи газа начинают истекать в окружающую жидкость. Давление газов в пузыре сначала больше гидростатического, с течением времени объем пузыря постепенно увеличивается, давление газов в пузыре при этом падает и в некоторый момент времени переходит от избыточного давления к разрежению. Радиус пузыря начинает уменьшаться, и в итоге происходит пережатие образующейся за кормой модели цилиндрической каверны и отделение донной каверны от газового пузыря. Донная каверна сохраняется при дальнейшем движении модели.

Последующая динамика газового пузыря определяет весь процесс заполнения шахты водой (см. рис. 2): сначала формируется осевая струя воды, которая достигает днища шахты, тормозится и заполняет водой донную часть шахты и затем разрушается. После разрушения струи начинается порционное отделение и всплытие газовых пузырей, что также наблюдается и в эксперименте.

При наличии хода лодки при заполнении шахты струя воды отклоняется в сторону, противоположенную скорости лодки. Вода начинает затекать по одной стороне шахты, а с противоположенной газ вытесняется из шахты, что

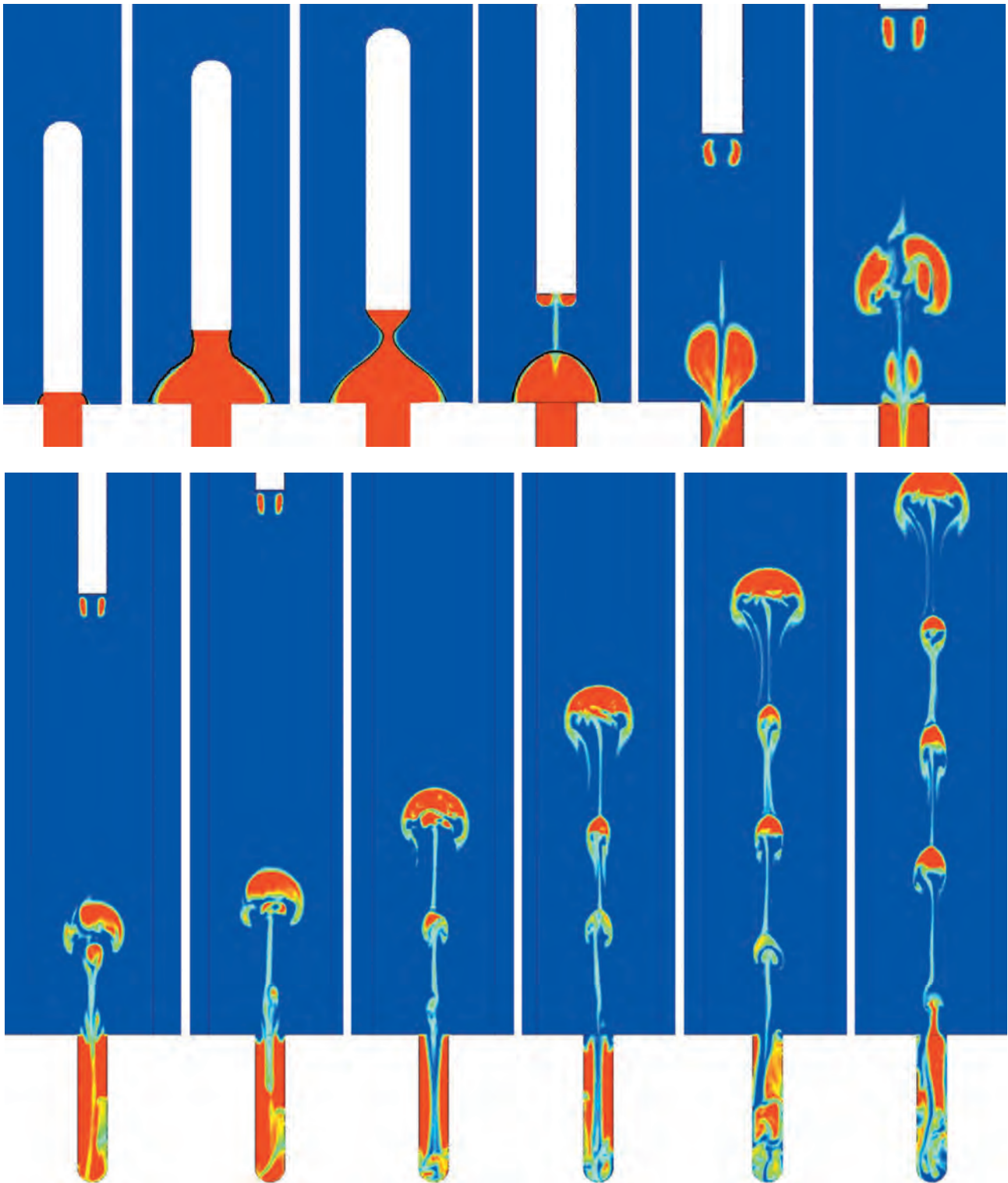
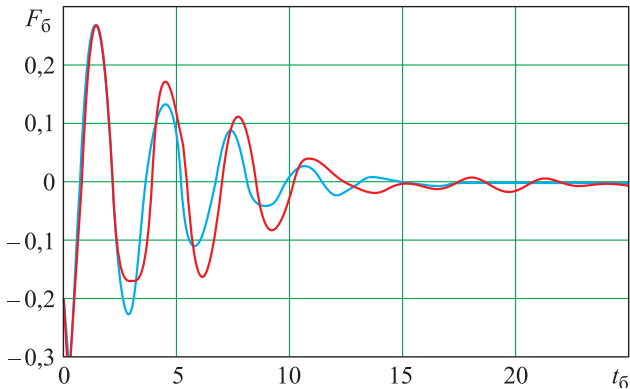


Рис. 2. Видеограмма процессов, протекающих без хода лодки:  
— – расчет; — – эксперимент

приводит к сокращению времени полного заполнения шахты водой. По рассчитанному и замеренному в эксперименте давлению определена действующая на шахту возмущающая вертикальная сила  $F$ : отрицательная сила действует на притопление, а положительная – на

подвсплытие лодки. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей безразмерной возмущающей вертикальной силы  $F_0$  от безразмерного времени  $t_0$  приведено на рис. 3. Сила  $F_0$  находится по формуле  $F_0 = F / (P_\infty S_H)$ , где  $P_\infty$  – гидростатическое давление;  $S_H$  – пло-



**Рис. 3.** Расчетная и экспериментальная зависимости безразмерной возмущающей вертикальной силы  $F_6$  от безразмерного времени  $t_6$ :  
— расчетная, — экспериментальная

щадь сечения шахты. Безразмерное время  $t_6$  вычисляется по формуле:

$$t_6 = \frac{t}{D_H} \sqrt{\frac{P_\infty}{\rho}},$$

где  $\rho$  – плотность воды;

$D_H$  – диаметр шахты.

Можно наблюдать хорошее соответствие расчетной и экспериментальной зависимостей  $F_6(t_6)$ , имеющих знакопеременный характер. Их наибольшие отрицательные значения достигаются в начале разгерметизации шахтного объема, когда давление газов в шахте максимальное, а максимальные положительные значения – при достижении наибольшего разрежения в шахте. Закон изменения во времени амплитуды возмущающей силы близок к закону затухающих колебаний.

Действующее на модель гидродинамическая сила сопротивления  $X$  представляется выражением:

$$X = C_x q S_M,$$

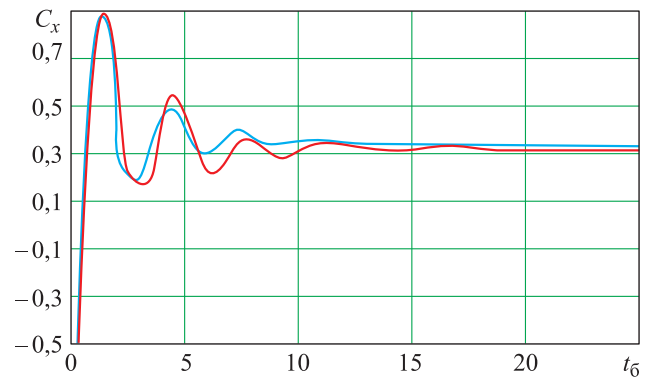
где  $C_x$  – коэффициент сопротивления модели;

$q$  – скоростной напор;

$S_M$  – площадь миделевого сечения модели.

На рис. 4 приведены графики  $C_x(t_6)$ , рассчитанные с ходом и без хода лодки. Законы изменения  $C_x(t_6)$  близки к описанному выше закону изменения  $F_6(t_6)$ .

При численном моделировании стартовых процессов появляется возможность с помощью обработки результатов построить обобщенные спектры пульсаций давления, нап-



**Рис. 4.** Расчетные зависимости коэффициента сопротивления модели  $C_x$  от безразмерного времени  $t_6$ :  
— без хода лодки, — с ходом лодки

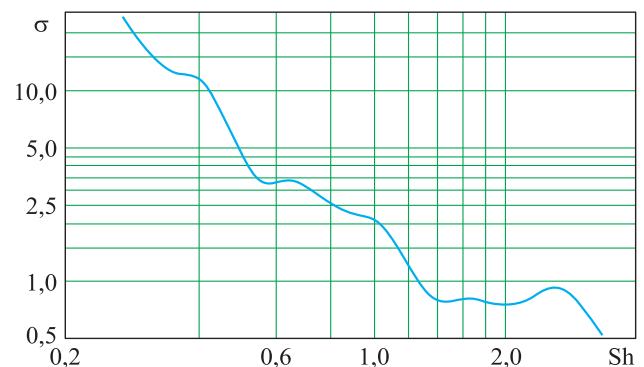
пример, в рассматриваемом случае, в процессе разгерметизации и эволюции газового пузыря (рис. 5). В данном случае параметр величины пульсаций давления  $\sigma$  определяется как

$$\sigma = \frac{\sqrt{f_0} \sigma_{1Гц}}{\sigma_\Sigma},$$

где  $f_0 = v / D_H$  ( $v$  принята равной скорости выхода модели из шахты);

$\sigma_{1Гц}$  – среднеквадратичное значение амплитуды пульсаций в полосе частот  $\Delta f$  шириной 1 Гц;

$\sigma_\Sigma$  – суммарное по всему спектру среднеквадратичное значение амплитуд пульсаций давления, характеризующее энергию колебательного процесса в целом.



**Рис. 5.** Обобщенные спектры пульсаций давления в процессе разгерметизации объема шахты

Безразмерная частота акустического источника определяется числом Струхала  $Sh = f/f_0$  [5]. Очевидно, основная энергия колебаний газового пузыря лежит в области низких частот, соответствующих первичным собственным формам колебаний газового объема  $V$ .



Возникновение гидродинамического источника шума связано с тем, что образующийся при старте колеблющийся в жидкости газовый объем производит вокруг себя периодическое сжатие и разрежение и перемещение частиц жидкости и таким образом приводит к возникновению звуковых волн. Источником энергии, уносимой этими волнами, является кинетическая энергия движущихся границ газового объема. Полная интенсивность излучаемого звука  $J$  определяется при этом квадратом второй производной по времени от его объема [6]:

$$J = \frac{\rho \ddot{V}^2}{4\pi c}$$

Хорошее соответствие расчетов с результатами экспериментов служит подтверждением надежности и достоверности разработанного численного метода моделирования стартовых нагрузок на ракету и подводную лодку.

### Список литературы

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
2. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
3. ANSYS CFX 13. User Guide, 2011.
4. A New – Eddy – Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation / T.-H. Shih et al. // Computers Fluids. 1995. 24 (3). Pp. 227–238.
5. Антонов А. Н., Кузнецов В. М., Комаров В. В. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

*Работа выполнена при поддержке гранта 14-08-00128 Российского фонда фундаментальных исследований.*

**Поступила 23.11.16**

---

**Пегов Валентин Иванович** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Южно-Уральский научный центр», г. Миасс Челябинской обл. Область научных интересов: математическое моделирование, гидродинамика, газодинамика, динамика летательных аппаратов.

**Мошкин Игорь Юрьевич** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Южно-Уральский научный центр», г. Миасс Челябинской обл. Область научных интересов: гидродинамика, газодинамика, динамика летательных аппаратов, тепломассообмен.

**Меркулов Евгений Сергеевич** – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Южно-Уральский научный центр», г. Миасс Челябинской обл. Область научных интересов: тепломассообмен, гидродинамика, газовая динамика, ударно-волновые процессы.

**Чешко Антон Дмитриевич** – ведущий инженер, руководитель группы АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», г. Миасс Челябинской обл. Область научных интересов: тепломассообмен, гидродинамика, газодинамика, акустика.

## **Numerical simulation of hydrodynamic loads on starting rocket and submarine**

The paper proposes a solution to the problem of determining hydrodynamic loads on the rocket and submarine using numerical simulation based on the control volume method in a three-dimensional non-stationary problem statement. We took into consideration contours, rocket and submarine velocity, medium two-phase state (gas – liquid), viscosity and gravity. We calculated the start effects on the rocket and submarine for two cases: when the submarine is moving and stationary. The reliability and accuracy of the calculations were confirmed by comparing them with the results of the tests on a model in the hydro tank at JSC Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre.

*Keywords: underwater launch, gas bubble, hydrodynamics, simulation.*



**Pegov Valentin Ivanovich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Research Scientist of the Federal State Budgetary Scientific Institution South Ural Research Centre, Miass, Chelyabinsk regio.

Science research interests: mathematical simulation, hydrodynamics, gas dynamics, aircraft dynamics.

**Moshkin Igor Yurievich** – Candidate of Engineering Sciences, Junior Research Scientist of the Federal State Budgetary Scientific Institution South Ural Research Centre, Miass, Chelyabinsk region.

Science research interests: hydrodynamics, gas dynamics, aircraft dynamics, heat-mass exchange.

**Merkulov Evgeniy Sergeevich** – Junior Research Scientist of the Federal State Budgetary Scientific Institution South Ural Research Centre, Miass, Chelyabinsk region.

Science research interests: heat-mass exchange, hydrodynamics, gas dynamics, shock-wave processes.

**Cheshko Anton Dmitrievich** – Leading engineer, team manager, JSC Academician V. P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region.

Science research interests: heat-mass exchange, hydrodynamics, gas dynamics, acoustics.