

ТЕХНОЛОГИЯ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ПУШЕЧНЫХ УСТАНОВОК

В. Р. Ефремов², А. С. Козелков¹, В. В. Курулин¹, Ю. Г. Нечепуренко², А. В. Саразов¹,
А. С. Кривонос¹

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, Саров

² АО «КБП» им. А.Г. Шипунова, 300001, Тула

УДК 517.968

Гидротормоз является главным конструктивным элементом противооткатного устройства — важнейшей составной части пушечных установок артиллерийских орудий. Доклад посвящен описанию разработанной технологии трехмерного моделирования физических процессов, протекающих в концентричных наствольных гидротормозных устройствах с профильной поверхностью гидроцилиндра и наличием в нем свободного объема рабочей полости. Технология основана на численном решении системы уравнений Навье-Стокса, которая дополняется уравнением переноса для отслеживания движения границы «рабочая жидкость-свободный объем» методом VOF

Ключевые слова: гидротормоз, метод подвижных деформирующихся сеток, метод VOF, противооткатные устройства, пушечные установки

Введение

Гидротормоз является главным конструктивным элементом противооткатного устройства — важнейшей составной части пушечных установок артиллерийских орудий [1]. Противооткатное устройство, предотвращающее разрушение пушечной установки путем погашения импульса от выстрела, может состоять из одного или нескольких гидротормозов, назначением которых является торможение наката и отката ствола с заданными законами сопротивления движению, обеспечивающими работу автоматики других механизмов. Определение тактико-технических характеристик процесса работы гидротормоза связано с определением параметров демпфирования силы действия пороховых газов, на которое влияют процессы перетекания рабочей жидкости при откате через систему полостей. В настоящее время существуют возможности численного моделирования процессов работы гидротормоза, что позволяет существенно упростить и ускорить усовершенствование его конструкции, минуя стадию натурных экспериментов. Наиболее перспективным является трехмерное моделирование с учетом всех особенностей геометрии задачи.

Доклад посвящен описанию разработанной технологии трехмерного моделирования физических процессов, протекающих в концентричных наствольных гидротормозных устройствах с профильной поверхностью гидроцилиндра и наличием в нем свободного объема рабочей полости. Рассматриваемая конструкция гидротормоза совмещает откатник с накатником, что уменьшает массо-габаритные характеристики устройства. Технология основана на численном решении системы уравнений Навье-Стокса, которая дополняется уравнением переноса для отслеживания движения границы «рабочая жидкость-свободный объем» методом VOF (Volume of Fluid) [2, 3]. В качестве метода решения системы используется итеративный алгоритм PISO [2] совместно с решателем СЛАУ, основанном на алгебраическом многосеточном методе [4]. Для увеличения точности решения вблизи границы фаз используются схемы, сжимающие фронт раздела фаз — HRIC и MCICSAM [2]. Моделирование подвижных частей производится путем применения метода подвижных деформирующихся сеток [5], учет которых в исходных уравнениях осуществлен с использованием приближения

Работа выполнена при поддержке АО «КБП» им. Шипунова А.Г. (г. Тула) в рамках НИР «Моделирование концентричных наствольных гидротормозных устройств с профильной поверхностью гидроцилиндра и наличием в нем свободного объема рабочей полости», а также при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта №16-01-00267).

Лагранжа-Эйлера [5]. Разработанная технология позволяет моделировать полный цикл работы гидротормозного устройства: откат подвижных частей при выстреле и обратный накат при приведении пушечной установки в положение следующего выстрела.

В докладе представлено описание технологии. В качестве основной задачи рассматривается работа гидротормозного устройства в различных постановах. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными на стендах АО «КБП».

1 Описание задачи

Гидротормоз предназначен для поглощения энергии подвижных частей при откате и плавного торможения их при накате и исключения удара в крайних положениях. Гидротормоз расположен концентрично относительно ствола и конструктивно состоит из кожуха с профилированной внутренней поверхностью, кольцевого поршня, закрепленного непосредственно на наружной поверхности ствола и имеющего отверстия под направляющие стержни с многожильными пружинами накатника, равномерно распределенными вокруг ствола в полости гидротормоза, а также переднего и заднего сальников с кольцевыми резиновыми уплотнениями круглого сечения, обеспечивающих герметичность полости гидротормоза, заполненной рабочей жидкостью с заданными физико-химическими свойствами, далее жидкость (рис. 1).

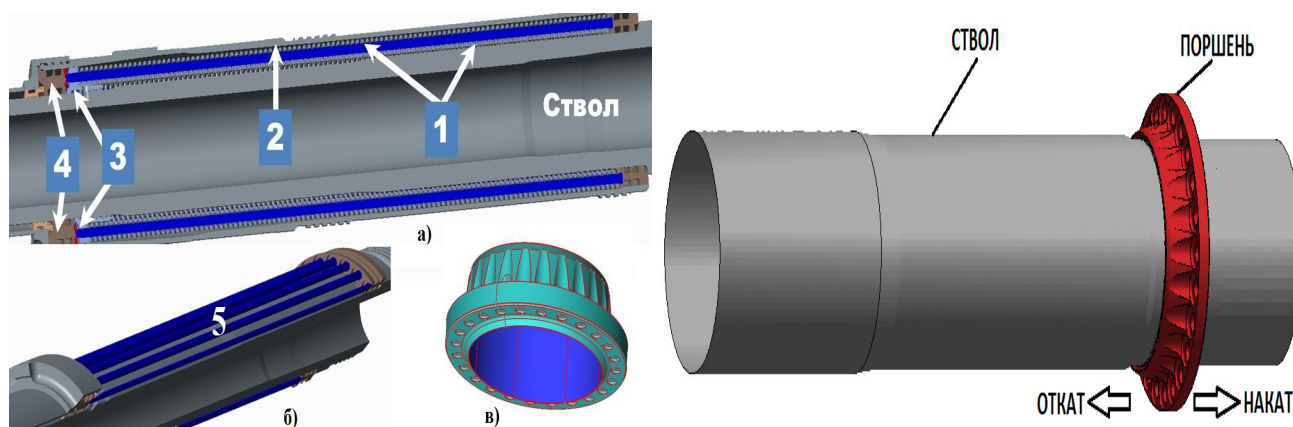


Рис. 1: Слева: Общая схема гидротормоза пушечной установки: а) — Общая схема (1 - цилиндр с рабочей жидкостью с направляющими и пружинами; 2 — кожух, 3 — поршень, 4 - сальники); б) — общая схема без кожуха (5 — направляющие); в) — поршень; справа — принципиальная схема работы

Последовательность этапов работы гидротормоза следующая. Гидротормоз начинает оказывать значительной силу сопротивления при откате подвижных частей после выбора свободного объема в откатной полости, при этом жидкость из откатной полости (полость между поршнем и задним сальником) ускоренно пробрызгивается через зазоры в накатную полость (полость между поршнем и передним сальником), вследствие чего происходит торможение подвижных частей до полной их остановки.

Накат подвижных частей происходит за счет энергии, запасенной при торможении пружинами накатника. В накате жидкость из накатной полости пробрызгивается через зазоры в откатную полость, обеспечивая требуемый закон торможения в накате. Как для отката, так и для наката площади перетекания в гидротормозе образованы зазорами между поршнем и профилем на кожухе, определяющими закон движения, а также между отверстиями в поршне и стержнями.

Численное моделирование работы гидротормоза связано с моделированием следующих физических процессов:

- турбулентное течение жидкости при наличии внезапных сужений, расширений и осесимметричных зазоров;
- течение многофазной смеси, с различными уравнениями состояния. Для жидкости целесообразно использовать приближение постоянства плотности, для воздуха — уравнение состояния идеального газа;
- течение с наличием подвижных твердых тел.

В рамках настоящей работы разработана математическая модель, включающая данные физические процессы.

2 Математическая модель и численная схема

Моделирование работы гидротормозного устройства связано с моделированием течения многофазной среды, состоящее из двух и более количества фаз. Каждая фаза может иметь своё отличное уравнение. Будем полагать, что в течении одного цикла работы гидротормоза течение изотермическое, и что поле скорости общее для всех фаз — так называемая односкоростная модель [6, 7]. С учетом данных допущений для описания движения среды можно записать систему уравнений в декартовой системе координат, состоящую из уравнения сохранения массы, уравнения сохранения импульса и уравнения переноса объёмной доли:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = \sum_{\xi} \alpha_{\xi} \rho_{\xi} s_{\xi}, \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i, \\ \frac{\partial \rho_{\xi} \alpha_{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \rho_{\xi} \alpha_{\xi}) = s_{\xi}, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время, $u_i = \{u_1, u_2, u_3\} = \{u, v, w\}$ — скорость, x_i — компонент пространственного вектора, s — объёмный источник или сток, τ_{ij} — тензор вязких напряжений, g_i — вектор ускорения свободного падения, ξ — индекс, указывающий на принадлежность к отдельной фазе, α_{ξ} — объёмная доля ξ -й фазы, ρ — результирующая плотность, представляющая собой усреднённое значение плотности по всем фазам:

$$\rho = \sum_{\xi=1}^N \rho_{\xi} \alpha_{\xi} \quad (2)$$

где N — количество фаз.

Тензор вязких напряжений для сжимаемой ньютоновской жидкости выражается уравнением [18]:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (3)$$

где $\mu = \sum_{\xi=1}^N \mu_{\xi} \alpha_{\xi}$ — результирующая молекулярная динамическая вязкость, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j; \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases}$ — символ Кронекера.

Важной особенностью задачи является необходимость учета движения подвижных частей, которые в процессе моделирования перемещаются более чем на половину длины всего гидротормоза. Для учета движения был выбран метод деформации расчетной сетки без изменения ее топологии [5]. Для предотвращения излишней деформации расчетных ячеек узлы расчетной сетки, расположенные на неподвижных элементах (кожух, направляющие стержни) двигались сообразно перемещению поршня, сохраняя при этом свою геометрию. Деформация сетки осуществлялась методом IDW [5].

Учет движения сетки в системе уравнений (1) осуществлялся путем использования Лагранже-Эйлерового приближения [10]. Для этого вводилась скорость движения сетки $u_i^g(t, x, y, z)$ и относительная скорость жидкости $u_i^* = u_i - u_i^{grid}$. Выбранный способ учета движения сетки является оптимальным, поскольку не требует перестроения топологии сетки и в то же время является консервативным относительно основных величин.

Экспериментальные данные по работе гидротормоза позволяют оценить число Рейнольдса, которое в цилиндрическом зазоре при откате подвижных частей составляет $Re = 10^5 - 10^6$. Для учета турбулентных составляющих течения при таком числе Рейнольдса целесообразнее всего является использование RANS подхода, основанного на решении системы (1) осредненной по Рейнольдсу [11]. Для замыкания осредненной системы уравнений используется модель турбулентности SST, которая хорошо зарекомендовала себя при решении практических задач [12]. Результирующая система уравнений решается путем численного интегрирования на конечно-объемной расчетной сетке. Для дискретизации уравнений используется оригинальный

полностью неявный метод решения уравнений Навье-Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью [3].

Для дискретизации уравнений по времени используется трехслойная схема второго порядка точности [13]. Дискретизация конвективных членов в уравнении движения, уравнении переноса турбулентных параметров осуществляется по противопоточной схеме LUD [13], в уравнении переноса объемной доли фаз — по схеме HRIC [6], позволяющей предотвращать излишнюю численную диффузию раздела фаз. Учет силы тяжести производился с использованием алгоритма, основанного на поправке объемных сил типа Рхи-Чоу.

Данная математическая модель и численная схема была реализована на базе пакета программ ЛОГОС [14, 15], позволяющей проводить эффективное распараллеливание и использовать многосеточные технологии для решения СЛАУ [16]. Итоговая реализация метода прошла верификацию на различных задачах турбулентных течений однородной и многофазной сред [3, 4, 14, 15, 17].

3 Численное моделирование работы гидротормоза

Описанная выше численная методика используется для моделирования работы гидротормоза. На первом этапе моделирования целесообразно рассмотреть однофазное приближение, в котором пренебрегается наличием воздуха в рабочем объеме гидротормоза. Данное допущение существенно упрощает численное моделирование, однако влияет на итоговый результат, поэтому представленные результаты можно рассматривать как первое приближение к решению задачи в полной постановке.

Рассматривается режим работы гидротормоза, в котором моделируется процесс наката подвижных частей, когда подвижные части вместе с поршнем (см. рис. 1 справа) под действием пружин, преодолевая гидродинамическую силу, действующую со стороны жидкости перемещаются из своего крайне левого положения в крайне правое.

Для данной задачи были построены последовательно сгущающиеся неструктурированные расчетные сетки. Параметры сеток приведены в таблице 1.

Таблица 1: Параметры расчетных сеток ($\delta_0 = 0.001\text{м}$ базовый размер ячейки)

№	Базовый размер ячеек	Размер вблизи поршня	Кол-во ячеек, млн
G1	δ_0	$0.25 \cdot \delta_0$	4.0
G2	$0.75 \cdot \delta_0$	$0.17 \cdot \delta_0$	8.5
G3	$0.5 \cdot \delta_0$	$0.125 \cdot \delta_0$	12.0

Сетки имеют сгущение вблизи поршня, а также в зазорах между поршнем и кожухом, где происходит наиболее интенсивное движение жидкости. На рисунке 2 изображены фрагменты расчетной сетки G1.

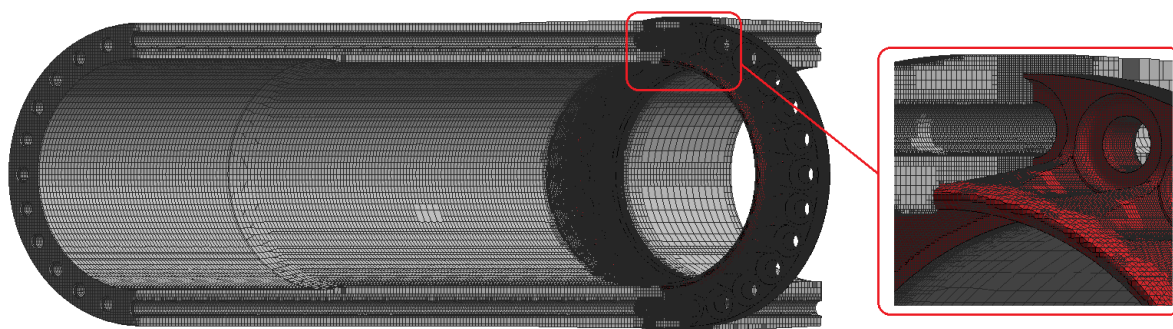


Рис. 2: Фрагменты расчетной сетки G1

При построении сетки положение поршня выбиралось посередине между его крайним левым положением, которое он занимает вначале наката и крайним правым, которое является конечным для наката. Это позволяет минимизировать деформацию сетки в процессе расчета, но требует предварительного этапа, в котором поршень без учета движения жидкости сдвигается на исходную позицию крайне левую позицию.

Проводилось решение задачи в нестационарной постановке, шаг по времени составлял $10^{-3}t_0$, где t_0 — полное время движения поршня в накате. Силы, действующие на поршень, скорость его движения, а также

его положение вычислялось в конце каждого шага по времени, после установления решения уравнений Навье-Стокса.

В процессе расчета поршень вместе с подвижными частями ускоряется под действием пружин и набирает максимальную скорость V_0 . Далее поршень попадает в профилированный участок кожуха, уменьшающий зазор, вследствие чего возрастает гидродинамическое сопротивление жидкости, которое, в конечном счете, приводит к остановке поршня и всех подвижных частей. На рисунке 3 показано поле амплитуды скорости в различные моменты времени.

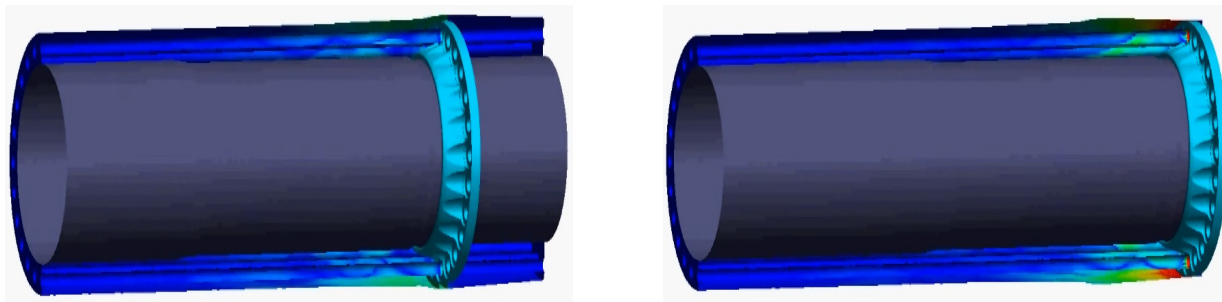


Рис. 3: Поле амплитуды скорости, $t = 0.6 \cdot t_0$ (слева), $t = 0.9 \cdot t_0$ (справа)

По распределению поля амплитуды скорости видно, как в конечный момент времени амплитуда скорости в зазоре между поршнем и кожухом достигает своих максимальных значений. На рисунке 4 изображен график скорости поршня, в зависимости от перемещения в сравнении с экспериментальными данными. График представлен в безразмерном виде.

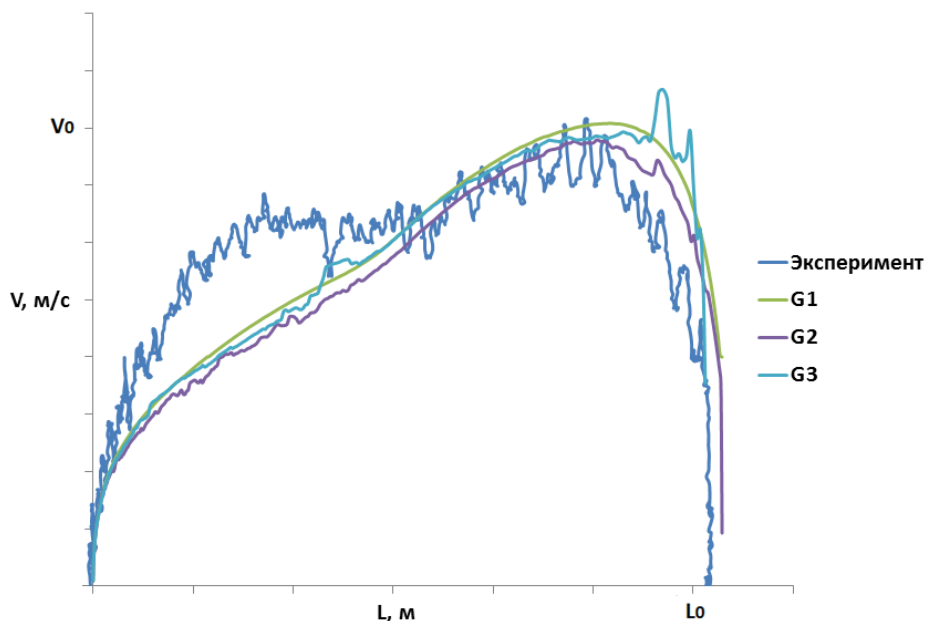


Рис. 4: График скорости поршня в зависимости от его положения

По графику видно, что результаты, полученные на сетках G1–G3, близки друг к другу, среднее отклонение не превышает 5 %. Это указывает на достаточность используемого сеточного разрешения. Сравнение кривых показывает, что в первой половине графика наблюдается некоторое различие между расчетными и экспериментальными данными. Это связано с отсутствием в расчете воздушной среды, которая присутствует в эксперименте. В расчете, гидротормоз, полностью заполненный жидкостью, завышает силу, действующую на поршень со стороны жидкости, что приводит к менее интенсивному разгону поршня в начальный момент. Вторая половина графика соответствует этапу, когда в эксперименте в накатной полости остается минимальное количество воздуха и по всей площади зазора кожух-поршень течет жидкость. И здесь

наблюдается лучшее согласие расчетных и экспериментальных данных. Также нужно отметить хорошее совпадение кривых до момента времени $0.05 \cdot t_0$, что соответствует этапу, когда поршень начинает разгон и еще не испытывает серьезного сопротивления со стороны жидкости - это указывает на верное моделирование кинематики поршня. В целом, расчет показывает верную качественную картину движения поршня и течения жидкости. Учет наличия свободного газового объема внутри гидротормоза позволит увеличить точность расчета в первой половине рассматриваемого режима.

Список литературы

- [1] Жуков И.И., Башкатов В.А., и др., Артиллерийское вооружение. Основы устройства и конструирование // М.: Машиностроение, 1975, 420 с.
- [2] Ubbink O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces // PhD thesis, Imperial College, University of London, 1997.
- [3] Козелков А.С., Мелешкина Д.П., Куркин А.А., Тарасова Н.В., Лашкин С.В., Курулин В.В. Полностью неявный метод решения уравнений Навье-Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью // Вычислительные технологии, 2016, Том 21, № 5, с. 54–76.
- [4] Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Козелков А.С., Тетерина И.В. Алгебраический много-сеточный метод в задачах вычислительной физики // Вычислительные методы и программирование, 2014, т. 15, стр. 183–200.
- [5] Benek J. A., Donegan T. L., Suhs N. E., Extended Chimera Grid Embedding Scheme With Application to Viscous Flow // AIAA Paper. 1987. № 87–1126.
- [6] Ubbink O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. PhD thesis, Imperial College, University of London, 1997.
- [7] Rusche H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. PhD thesis, Imperial College, University of London, 2002.
- [8] Khrabry A. I., Smirnov E. M., Zaytsev D. K. Solving the convective transport equation with several high-resolution finite volume schemes. Test computations // Proc. 6th Int. Conf. on Computational Fluid Dynamics (ICCFD-6), July 12-16, 2010, St. Petersburg, Russia. Ed. A. Kuzmin. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, PP. 535–540.
- [9] Яцевич С.В., Курулин В.В., Рубцова Д.П. О применении алгоритма PISO в задачах динамики молекулярно-несмешивающихся жидкостей // ВАНТ, сер. математическое моделирование физических процессов. 2015. № 1. стр. 16–29.
- [10] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950.
- [11] Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей в двух томах. М: Мир, 1991.
- [12] Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Experience with the SST Turbulent Model. Turbulence, Heat and Mass Transfer 4. Ed. by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. Begell House Inc., 2003.
- [13] Jasak H. Error Analysis and Estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. Thesis submitted for the degree of doctor // Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, 1996.
- [14] Козелков А. С., Курулин В. В., Лашкин С. В., Шагалиев Р. М., Ялозо А. В. Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2016, том 56, № 8, с. 1524–1535

- [15] Сафронов А.В., Дерюгин Ю.Н., Жучков Р.Н., Зеленский Д.К., Саразов А.В., Козелков А.С., Кудимов Н.Ф., Липницкий Ю.М., Панасенко А.В. Результаты валидации многофункционального пакета программ ЛОГОС при решении задач аэрогазодинамики старта и полета ракет-носителей // Математическое моделирование, 2014, т. 26, № 9, с. 83–95.
- [16] Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Лашкин С.В., Силаев Д.П., Симонов П.Г. Реализация метода расчета вязкой несжимаемой жидкости с использованием многосеточного метода на основе алгоритма SIMPLE в пакете программ ЛОГОС // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2013, выпуск 4.
- [17] Козелков А.С. Методика численного моделирования цунами оползневого типа на основе уравнений Навье-Стокса // Вычислительная механика сплошных сред, 2016, том 9, № 2, стр. 218–236.
- [18] Ландау Л.Д., Лифшиц В.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1988.

*Ефремов Валентин Робертович — советник управляющего директора АО «КБП» им. А.Г. Шипунова,
e-mail: valentin_e@mail.ru;*

*Козелков Андрей Сергеевич — д.ф.-м.н., заместитель начальника отдела, начальник научно-исследовательской
лаборатории Института теоретической и математической физики ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»;
старший научный сотрудник кафедры «Прикладная Математика» Нижегородского Государственного
Технического Университета им. Р.А. Алексеева;*

*Курулин Вадим Викторович — к.ф.-м.н., научный сотрудник Института теоретической и математической
физики ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»;
e-mail: askozelkov@mail.ru;*

*Нечепуренко Юрий Григорьевич — д.т.н., технический руководитель по комплексам активной защиты и
пушечным вооружениям АО «КБП» им. А.Г. Шипунова,
e-mail: nechepur@gmail.com;*

*Саразов Алексей Владимирович — старший научный сотрудник Института теоретической и математической
физики ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»;
e-mail: alex_sar@bk.ru;*

*Кривонос Алексей Станиславович — старший научный сотрудник Института теоретической и
математической физики ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»;
e-mail: askrivonos1@rambler.ru.*

Дата поступления — 25 мая 2017 г.