

На правах рукописи



Савихин Игорь Олегович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ПРОТИВООТКАТНЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 01.02.06 – динамика,
прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2010

Работа выполнена в Научно – исследовательском институте механики
Государственного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
Кочетков Анатолий Васильевич

кандидат технических наук, доцент
Садовский Вадим Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Дерендяев Николай Васильевич

доктор технических наук, профессор
Липатов Игорь Викторович.

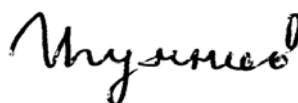
Ведущая организация: Балтийский государственный технический университет
“Военмех” им. Д.Ф.Устинова, Санкт-Петербург.

Защита состоится 29 декабря 2010 года в 14.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном
университете по адресу: 603950, ГСП 1000, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
корп. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета.

Автореферат разослан 26 ноября 2010 года

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физ.-мат. наук, проф.



Игумнов Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из важнейших элементов современных артиллерийских орудий является противооткатное устройство (ПОУ), которое гасит импульс от выстрела, предотвращая разрушение орудия. ПОУ может состоять из одного или нескольких гидравлических тормозов. Гидротормоз представляет собой замкнутую совокупность полостей, заполненных рабочей жидкостью, соединяющихся через систему отверстий.

Применение технологии численного моделирования работы подобных устройств упрощает процесс проектирования и снижает его стоимость. На данном этапе развития вычислительной техники и численных методов для решения подобных динамических задач в трехмерной постановке требуются многопроцессорные ЭВМ, которые пока являются уникальными и используют специальное программное обеспечение. Это обстоятельство и по настоящее время определяет выбор подходов при решении таких задач в сторону значительного упрощения расчетных схем. Основные трудности в моделировании процесса высокоскоростного демпфирования связаны с определением параметров массоперетока, которые зависят от скорости отката, а также от геометрии и распределения отверстий в рабочих сосудах, через которые перетекает жидкость. В традиционном подходе для определения параметров массоперетока используются постоянные значения гидравлических сопротивлений, полученных экспериментально для каждого типа профилированного отверстия. Такой подход не позволяет достаточно точно описать поведение ПОУ, так как он не учитывает взаимное влияние параметров течения сквозь систему проходных отверстий. Взаимное влияние потоков жидкости через систему проходных отверстий экспериментально установлено и описано только для простейших случаев. Задача экспериментального определения взаимного влияния потоков для сложных конструкций с неравномерным распределением проходных сечений, которым и является гидравлический тормоз, является технологически сложной и в ряде случаев невозможной. Поэтому в настоящий момент актуально развитие имеющихся методик с использованием современных вычислительных систем для подробного исследования закономерностей массоперетока в сложных узлах ПОУ.

Цели диссертационной работы

Целью данной работы является разработка эффективных методик, алгоритмов и программ численного моделирования действия высокоскоростных гидравлических демпферов артиллерийских систем с произвольным геометрическим распределением отверстий в рабочих полостях ПОУ.

Научная новизна

Полученные численные результаты исследования перетекания жидкости в системах сосудов высокого давления содержат новые данные о значительном влиянии местоположения соединительных отверстий и расстояния между ними на параметры процессов истечения.

Разработана новая методика и алгоритм численного расчета работы высокоскоростных гидравлических демпферов, которые позволяют учесть это влияние и повысить точность по отношению к традиционной методике расчета.

В ходе работы над диссертацией были получены следующие научные результаты:

Расчетным путем установлено сильное взаимное влияние потоков жидкости, проходящих через близлежащие отверстия перфорированных цилиндров гидравлического тормоза. Данный факт говорит о наличии серьезной погрешности при расчете задач численного моделирования высокоскоростных гидравлических демпферов с постоянными значениями коэффициентов

гидравлических сопротивлений при истечении жидкости. В случае несимметричного и неравномерного распределения перфорации на стенках цилиндров гидротормоза установлено, что зависимость изменения коэффициентов гидравлического сопротивления в зависимости от длины перемещения откатных частей ПОУ носит сложный характер и делает невозможным распространение этих распределений на устройства с отличающейся геометрией. Расчет с целью определения распределения гидравлических сопротивлений должен производиться для каждой конкретной геометрии устройства. Разработана новая методика численного моделирования, которая учитывает сложный характер изменения гидравлических сопротивлений и позволяет более точно описывать работу высокоскоростных гидравлических демпферов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов диссертационной работы

Численные исследования, связанные с определением коэффициентов гидравлических сопротивлений, подтверждены известными теоретическими и экспериментальными данными. Разработанная методика и алгоритм опробованы на реальном устройстве - стенде свободного отката (ССО). Численные решения соответствуют экспериментальным данным, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Практическая значимость работы

Подтверждена возможность расчета значений гидравлических сопротивлений профилированных отверстий в сообщающихся сосудах с помощью современных пакетов программ. Установлено, что учет взаимного влияния потоков жидкости при определении параметров массоперетоков, является одним из способов повышения точности решения задач динамики высокоскоростных демпфирующих устройств. Разработаны методика, алгоритм и программа расчета динамики противооткатных устройств, которые позволяют учесть подобное влияние. Программа используется в ОАО ЦНИИ «Буревестник».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты численного моделирования в трехмерной постановке истечения жидкости из перфорированного цилиндра при различных вариантах расположения отверстий, различных давлениях и числах Рейнольдса.
2. Методика, алгоритм и программа расчета динамики противооткатных устройств учитывающая взаимное влияние параметров потоков жидкости через систему отверстий.
3. Результаты численного моделирования динамики противооткатных устройств.

Личный вклад автора

Осуществлена разработка, отладка и верификация новой методики и алгоритма численного моделирования высокоскоростных гидравлических демпферов. Произведен расчет серии тестовых стационарных трехмерных задач с целью определения степени взаимного влияния потоков через отверстия перфорированного цилиндра. В результате анализа полученных результатов установлена высокая взаимозависимость параметров истечения жидкости через соседние отверстия. Произведен расчет серии стационарных трехмерных задач моделирующих гидротормоз ПОУ ССО с целью определения распределения значений гидравлических сопротивлений в зависимости от перемещения откатных частей. Произведено написание и отладка программы, реализующей расчет динамики ПОУ ССО в квазиодномерной постановке с учетом распределения значений коэффициентов гидравлических сопротивлений, полученных при решении квазистационарной трехмерной задачи на основе полных уравнений Навье - Стокса. Работа

связана с темой ОКР «Коалиция СВ» (Министерство Обороны Российской Федерации), темой 2010-1.2.1-101-013-005 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», темой №2.1.2./3863 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)».

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Основной печатный текст составляет 73 страницы, 163 рисунков, 11 таблиц, 1 страница списка используемой литературы (15 наименований).

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:

- V конференции молодых ученых (Нижний Новгород – 2006)
- Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы машиноведения» (Нижний Новгород – 2006)
- VIII Всероссийская конференция «Нелинейные колебания механических систем» (Нижний Новгород – 2008)
- Научной конференции ВРЦ РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения» (Саров – 2008)
- Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (Санкт-Петербург - 2008)
- Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (Санкт-Петербург - 2010)
- Семинаре по механике в НИИ Механике Нижегородского государственного университета под руководством проф. В.Г. Баженова

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновываются актуальность и практическая значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы, изложены положения, выносимые на защиту. Приводится краткий обзор работ по моделированию динамики высокоскоростных демпферов. Данное направление развивали Н.А. Букин, С.Б. Добринский, В.Ф. Захаренков, Б.Э. Кэрт, Ю.Б. Коверкин, И.Ф. Левурдов, Н.Т. Мелещенко, И.В. Медведев, В.М. Розенберг, и другие.

Первая глава посвящена исследованиям, связанным с численным моделированием процесса истечения жидкости через профилированное отверстие или группу отверстий с целью определения коэффициентов гидравлического сопротивления. Численное моделирование серии стационарных задач в трехмерной постановке осуществляется с использованием полных уравнений гидродинамики вязкой жидкости Навье – Стокса и метода конечных объемов. С помощью пакета программ ANSYS CFX 10.0 проведены следующие численные расчеты и исследования.

1. Определение гидравлического сопротивления единичного отверстия, соединяющего два сосуда цилиндрической формы. Полученное значение ($\xi=1.7$) совпадает с экспериментальным значением, что свидетельствует о достоверности численных результатов.
 2. Исследование взаимного влияния течения жидкости сквозь близлежащие отверстия, соединяющих два сосуда цилиндрической формы, на значения гидравлического сопротивления этих отверстий.
- Исследование взаимного влияния течения жидкости сквозь отверстия, распределенные по длине перфорированного цилиндра. Установлено, что распределение отверстий по образующей вдоль оси цилиндра вызывает уменьшение гидравлического сопротивления всех

отверстий по ходу течения жидкости. В случае с тремя отверстиями, расположенными по длине цилиндра, гидравлические сопротивления убывают по ходу потока. Минимальное изменение значения гидравлического сопротивления по сравнению с единичным отверстием возникает в первом отверстии по ходу потока ($\xi = 1.63$). Гидравлические сопротивления остальных отверстий понижаются до одного уровня $\xi = 1.5$.

- Выявление взаимного влияния течения жидкости сквозь отверстия, распределенные по длине окружности цилиндра (параллельному основанию). Распределение отверстий по окружности вызывает одинаковое уменьшение гидравлического сопротивления всех отверстий. В случае распределения восьми отверстий значения гидравлического сопротивления отверстий понижаются до уровня $\xi = 1.6$, что соответствует гидравлическому сопротивлению первого крайнего отверстия по ходу потока в случае распределения по образующей вдоль оси цилиндра.
- Изучение взаимного влияния течения жидкости сквозь близлежащие отверстия, распределенные одновременно по длине перфорированного цилиндра и по его окружности (рис 1, 2).

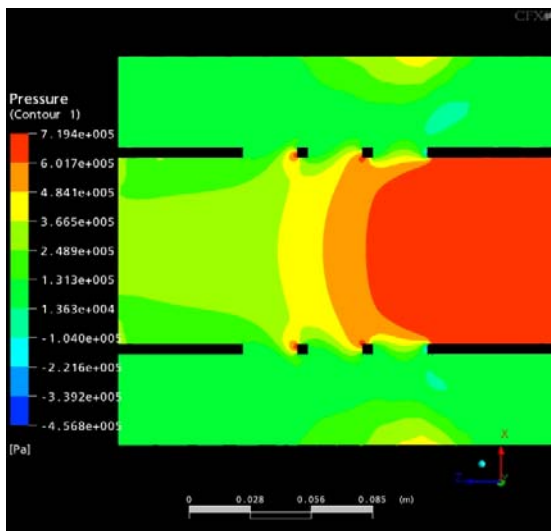


Рис.1 Распределение давления в сечении вдоль оси цилиндра

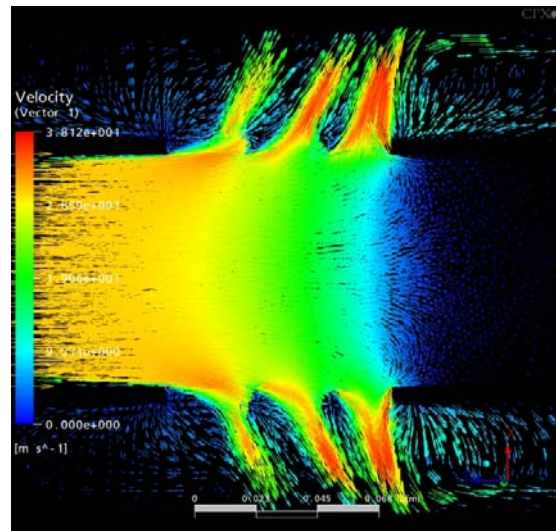


Рис.2 Распределение скорости течения в сечении вдоль оси цилиндра

В случае системы отверстий, распределённых по окружности, а также вдоль оси цилиндра (всего 24 отверстия - 3 группы отверстий D1, D2, D3 по 8 штук), значения гидравлических сопротивлений отверстий существенно изменяются по сравнению с предыдущими случаями. Это не позволяет выделить общую закономерность поведения гидравлических сопротивлений для произвольной геометрии. Для дальнейшего исследования необходимо рассматривать полную систему отверстий в конкретной конструкции. Из полученных результатов видно, что гидравлическое сопротивление отверстий уменьшается от крайней группы отверстий D1 (от $\xi = 4.1$) до крайней системы отверстий D3 (до $\xi = 1.6$). Такое поведение объясняется структурой потока жидкости: угол атаки увеличивается по мере движения в продольном направлении. Более острый угол атаки соответствует более высокому значению коэффициента гидравлического сопротивления

3. Исследование изменения характера течения и значений гидравлических сопротивлений системы отверстий в зависимости от вязкости жидкости. Установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления не зависит от вязкости жидкости. При увеличении динамической вязкости жидкости на порядок с 0.0008899 кг/(м·с) до 0.0071631 кг/(м·с) разница значений гидравлических сопротивлений составила от 0.4% до 2%, что находится в

пределах погрешности расчетов. Данные значения вязкости относятся соответственно к воде и специальной жидкости для противооткатных устройств ПОЖ-70.

4. Изучение характера течения через систему отверстий в зависимости от скорости втекающего в цилиндр потока (чисел Рейнольдса). В случае системы отверстий, распределённых одновременно по окружности и вдоль оси цилиндра (всего 24 отверстия - 3 группы отверстий D1, D2, D3 по 8 штук), изменение скорости потока жидкости, а соответственно и числа Рейнольдса, не вызывает существенного изменения гидравлического сопротивления для группы отверстий D2 и D3. Гидравлические сопротивления группы отверстий D1 заметно уменьшаются при числах Рейнольдса от 25000 до 100000. Далее на участке от 100000 до 225000 гидравлическое сопротивление отверстия D1 практически не меняется (рис. 3). Из результатов расчетов можно сделать вывод, что разность значений давления на граничных условиях (вход-выход) существенно не влияет на значения гидравлических сопротивлений отверстий системы.

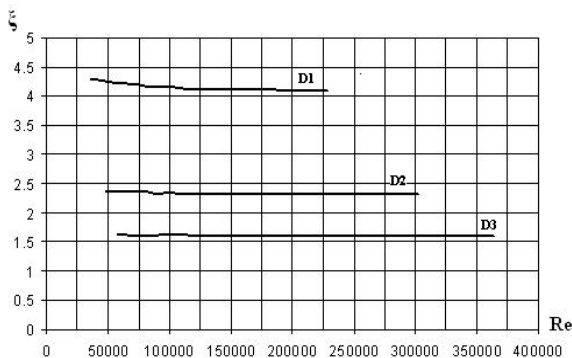


Рис. 3 Зависимость гидросопротивлений групп отверстий D1, D2, D3 от числа Рейнольдса

Во второй главе формулируется методика математического моделирования и алгоритм расчета, основанный на композиции решения одномерной динамической задачи движения откатных частей и решений серии стационарных трехмерных задач истечения рабочей жидкости. Одномерная динамическая задача описывает поступательное движение откатных частей под действием нагружающей силы с учетом реакции жидкости в системе на это движение. В этой задаче производится расчет перетекания жидкости в системе полостей сквозь отверстия перфорированных цилиндров с учетом коэффициентов гидравлического сопротивления этих отверстий. Значения этих гидравлических сопротивлений находятся в результате решения серии трехмерных стационарных задач с учетом особенности геометрии системы. Чтобы получить распределение значений гидравлических сопротивлений в любой момент расчетного времени, полученные результаты решений трехмерных стационарных задач интерполируются. Такое выделение стационарных задач возможно в силу небольших скоростей истечения жидкости по сравнению со скоростью волн в жидкости. Отношение этих скоростей не превышает значения 0.03, и влияние волновых процессов оказывается незначительным.

Описываемая методика применяется к реальной конструкции - стенду свободного отката (ССО) (см. рис 4).

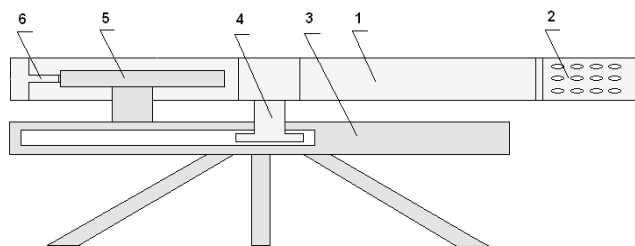


Рис. 4 Схема стенда свободного отката (1-ствол, 2-дульный тормоз, 3-станина, 4-направляющая, 5-противооткатное устройство, 6-шток)

Противооткатное устройство (5 на Рис.4) состоит из двух параллельно закрепленных гидравлических тормозов с участком свободного отката (рис. 5)

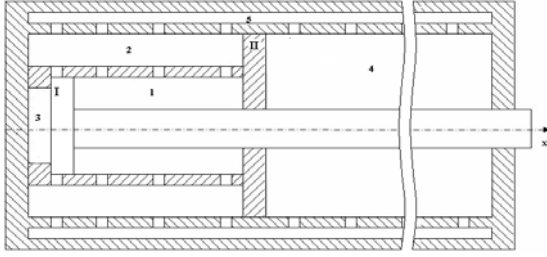


Рис. 5 Схема гидравлического тормоза с участком свободного отката.

Рассматривается математическая модель ПОУ ССО в одномерной постановке. До соударения поршней, уравнения движения подвижных частей высокоскоростного амортизатора с участком свободного отката описываются системой уравнений:

$$\frac{dv_I}{dt} = \frac{(F_{кн} - 2F_{мпI} - 2F_{gI})}{M_I}, \quad F_{gI} = p_1 S_1 - p_3 S_3,$$

$$\frac{dv_{II}}{dt} = \frac{(-F_{мпII} - F_{gII})}{M_{II}}, \quad F_{gII} = p_4 S_4 - (p_1 S_1 + p_2 S_2),$$

где F_{gI} – сила со стороны жидкости на поршень I, F_{gII} – сила со стороны жидкости на поршень II, $F_{кн}$ – сила воздействия пороховых газов, $F_{мпI}$ – сила трения на поршне I, $F_{мпII}$ – сила трения на поршне II, M_I – масса откатных частей за исключением поршня II, M_{II} – масса поршня II, S_n, p_n – соответственно площадь сечения полости и давление в полости n ($n=1\dots5$), v_I – скорость поршня I, v_{II} – скорость поршня II. Основная проблема заключается в определении гидравлических сил F_{gI} и F_{gII} . После соударения поршней уравнения движения откатных частей описываются системой уравнений совместного движения:

$$\frac{dv_I}{dt} = \frac{(F_{кн} - 2F_{мпI} - 2F_{мпII} - 2F_{gI})}{M_I + M_{II}}, \quad F_{gI} = p_1 S_1 + p_4 S_4 - (p_3 S_3 + p_2 S_2), \quad v_{II} = v_I.$$

Переток массы между областями определяется системой уравнений:

$$\frac{dM_{nk}}{dt} = G_{nk} S_{nk}, \quad G_{nk} = w_{nk} \rho_n, \quad w_{nk} = \pm \sqrt{\frac{2|p_n - p_k|}{\xi_{nk} \rho_n}}, \quad \frac{dp_n}{dt} = \frac{dp_n}{dt} C^2, \quad \frac{dp_k}{dt} = \frac{dp_k}{dt} C^2,$$

где w_{nk} – скорость перетока жидкости из полости n ($n=1\dots5$) в полость k ($k=1\dots5$); ξ_{nk} – коэффициент гидравлического сопротивления, усредненный по площади всех открытых отверстий между полостями n и k ; ρ_n – плотность жидкости в полости n ; ρ_k – плотность жидкости в полости k ; M_{nk} – масса жидкости, перетекающей из полости n в полость k ; S_{nk} – площадь проходного сечения между соседними полостями n и k ; G_{nk} – расход жидкости из полости n в полость k через проходное сечение площадью S_{nk} ; C – скорость звука в жидкости.

Сила со стороны жидкости на поршень I (до момента соударения поршней) представляет собой зависимость, выраженную дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{dF_{gI}}{dt} = S_1 \left(\frac{\rho_1 w_{12}^2}{2} \frac{d\xi_{12}}{dt} + \xi_{12} \left(\frac{w_{12}^2}{2} \frac{dp_1}{dt} + \rho_1 w_{12} \frac{dw_{12}}{dt} \right) \right) - S_3 \left(\frac{\rho_3 w_{23}^2}{2} \frac{d\xi_{23}}{dt} + \xi_{23} \left(\frac{w_{23}^2}{2} \frac{dp_3}{dt} + \rho_3 w_{23} \frac{dw_{23}}{dt} \right) \right) + C^2 (S_1 - S_3) \frac{dp_2}{dt}$$

Традиционный же подход использует упрощенный вид:

$$\frac{dF_{gI}}{dt} = S_1 \xi \left(\frac{w_{12}^2}{2} \frac{dp_1}{dt} + \rho_1 w_{12} \frac{dw_{12}}{dt} \right) - S_3 \xi \left(\frac{w_{23}^2}{2} \frac{dp_3}{dt} + \rho_3 w_{23} \frac{dw_{23}}{dt} \right) + C^2 (S_1 - S_3) \frac{dp_2}{dt}, \quad \text{где } \xi = \text{const}$$

Аналогично представляются зависимости для силы со стороны жидкости на поршень II.

Для определения гидравлических сопротивлений отверстий перфорированных цилиндров используется математическая модель, описывающая процессы истечения в трехмерной постановке. Она включает в себя уравнения Навье – Стокса, выражающие закон неразрывности, закон изменения количества движения и закон сохранения энергии с учетом работы вязких сил. Система уравнений замыкается уравнениями термодинамики и уравнением состояния. Для описания турбулентных режимов используется стандартная модель турбулентности $k - \varepsilon$. Численные расчеты выполнены с помощью пакета программ ANSYS CFX 10.0. Гидравлические сопротивления ξ для каждого отверстия, соединяющего полости n и k рассчитываются следующим образом:

$$\xi = \frac{2(p_n - p_k)}{\rho_n w^2}$$

где p_n – давление в подобласти, из которой истекает рабочая жидкость, p_k – давление в подобласти в которую втекает рабочая жидкость, ρ_n – плотность истекающей жидкости, w – скорость перетока жидкости через отверстие.

Численный алгоритм расчета коэффициентов гидравлических сопротивлений реализует динамический процесс как последовательность квазистационарных состояний. Расчет динамики системы разделяется на две части. Первая часть включает в себя определение кинематических параметров: расчет скорости, перемещения поршней, объемов полостей; далее вычисляются: плотность жидкости в полостях, давление в полостях. Вторая часть представляет собой соотношения массообмена: расчет расхода жидкости между полостями, переток массы и пересчет массы и давления в полостях с учетом массоперетока. Численная схема решения обыкновенных дифференциальных уравнений основана на аппроксимации системы по схеме Эйлера.

Описывается численная методика и алгоритм расчета высокоскоростного амортизатора с участком свободного отката в одномерной постановке. До соударения поршней:

$$v_I^{j+1} = v_I^j + \frac{(F_{кн} - 2F_{mpI} - 2F_{gI}) \cdot \Delta t}{M_I}, \quad F_{gI} = p_1^j \cdot S_1 - p_3^j \cdot S_3,$$

$$v_{II}^{j+1} = v_{II}^j + \frac{(-F_{mpII} - F_{gII}) \cdot \Delta t}{M_{II}}, \quad F_{gII} = p_4^j \cdot S_4 - (p_1^j \cdot S_1 + p_2^j \cdot S_2),$$

где j – номер временного слоя. После соударения поршней:

$$v_I^{j+1} = v_I^j + \frac{(F_{кн} - 2F_{mpI} - 2F_{mpII} - 2F_{gI}) \cdot \Delta t}{M_I + M_{II}}, \quad F_{gI} = p_1^j \cdot S_1 + p_4^j \cdot S_4 - (p_3^j \cdot S_3 + p_2^j \cdot S_2), \quad v_{II}^{j+1} = v_I^{j+1}.$$

При расчете удара двух поршней, численная схема учитывает только кинематическую составляющую процесса. После соударения оба поршня I и II будут двигаться с одной скоростью как единое тело, но с учетом того, что между ними находится слой жидкости.

Для каждой полости n ($n=1...5$) справедливы соотношения:

$$x_n^{j+1} = x_n^j + v_{I,II}^{j+1} \cdot \Delta t, \quad \Delta x_n = x_n^{j+1} - x_n^j, \quad \Delta V_n^{j+1} = S_n \cdot \Delta x_{I,II},$$

$$V_n^{j+1} = V_n^j \pm \Delta V_n^{j+1},$$

В случае если происходит уменьшение объема полости n ($\Delta V_n^{j+1} < 0$):

$$\Delta \rho_n^{j+1} = \frac{m_n^{j+1}}{V_n^{j+1}} - \frac{m_n^j}{V_n^j}, \quad \Delta p_n^{j+1} = p_n^{j+1} + \Delta \rho_n^{j+1} \cdot C^2, \quad p_n^{j+1} = p_n^j + \Delta p_n^{j+1},$$

В случае если происходит увеличение объема полости n ($\Delta V_n^{j+1} > 0$):

$$p_n^{j+1} = p_k^{j+1} + \frac{\rho_n^{j+1} \xi_{nk} \left(\frac{S_n v_{I,II}^{j+1}}{S_{nk}} \right)^2}{2},$$

где V_n^j – объем полости n на временном слое j ; k – номер полости, смежной с полостью n ($k=1, \dots, 5$); $v_{I,II}^j$ – скорость либо поршня I, либо поршня II в зависимости от того, какой поршень является «активным» (т.е. движение поршня вызывает изменение объема полости) для полости n на временном слое j ; $\Delta x_{I,II}$ – перемещение поршней, либо разность их перемещений, в зависимости от того какой поршень или оба являются «активными» для полости n ; ξ_{nk} – коэффициент гидравлического сопротивления, усредненный по площади всех «активных» отверстий между полостями n и k .

Переток массы между областями n и k описываются системой уравнений:

$$\Delta M_{nk}^{j+1} = G_{nk}^{j+1} \cdot S_{nk} \cdot \Delta t, \quad G_{nk}^{j+1} = w_{nk}^{j+1} \cdot \rho_n^j, \quad w_{nk}^{j+1} = \pm \sqrt{\frac{2|p_n^{j+1} - p_k^j|}{\xi_{nk} \cdot \rho_k^j}},$$

$$M_n^{j+1} = M_n^j - \Delta M_{nk}^{j+1}, \quad M_k^{j+1} = M_k^j + \Delta M_{nk}^{j+1},$$

$$\Delta p_n^{j+1} = \frac{M_n^{j+1}}{V_n^{j+1}} - \frac{M_n^j}{V_n^j}, \quad \Delta p_n^{j+1} = p_n^{j+1} + \Delta p_n^{j+1} \cdot C^2,$$

$$\Delta p_k^{j+1} = \frac{M_k^{j+1}}{V_k^{j+1}} - \frac{M_k^j}{V_k^j}, \quad \Delta p_k^{j+1} = p_k^{j+1} + \Delta p_k^{j+1} \cdot C^2,$$

Алгоритм расчета реализован в виде программы, написанной на языке C++ с интерфейсом для семейств ОС Windows.

В **третьей главе** описаны результаты численного моделирования динамики ПОУ ССО. Производится расчет динамики ПОУ ССО в одномерной постановке по традиционной методике с использованием одинакового значения коэффициента гидравлического сопротивления ($\xi=1,7$) для всех отверстий перфорированных цилиндров. Принимается, что значение гидравлического сопротивления не зависит от расположения соседних отверстий, характеристик потока и положения поршня. Проведено исследование сходимости решения, способа моделирования процесса совместного движения поршней, а также влияние этих способов на качество решения. Произведено сравнение двух решений: с учетом отрыва поршней друг от друга в процессе их совместного движения после соударения и без учета отрыва. Установлено, что использование алгоритма без учета отрыва поршней друг от друга на протяжении отката после их соударения не вызывает существенной потери точности решения, шаг по времени при этом может быть использован в 50 раз больше. Поэтому в дальнейшем приводятся результаты расчета движения поршней без учета отрыва. Сила трения на поршнях I до момента их соударения с поршнями II рассчитывается как $F_{мпI} = \mu M_I g$; сила трения на поршнях II до момента их соударения с поршнями I принимается за $F_{мпII} = \mu M_{II} g$; сила трения считается постоянной на протяжении отката после момента соударения поршней и равной $\mu(M_I + 2M_{II})g$, где μ – коэффициент трения ($\mu=0.2$), g – ускорение свободного падения ($g=9.81 \text{ м/с}^2$), M_I – масса откатных частей за исключением поршня II ($M_I=3610$ кг), M_{II} – масса поршня II (23 кг).

С целью сравнения результатов численного решения с данными, полученными в результате экспериментов в качестве нагружающей силы $F_{кн}$, используется вынуждающая сила пороховых газов, полученная экспериментально (рис. 6, 7):

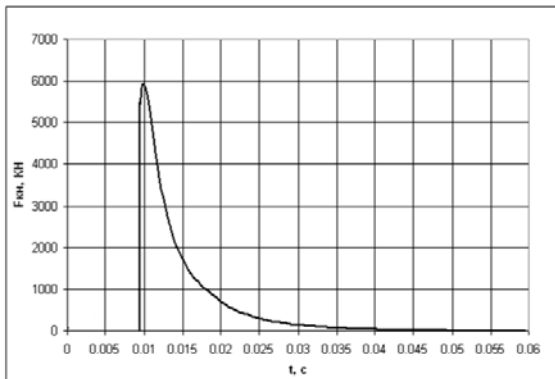


Рис. 6 Нагружающая сила (первый эксперимент)

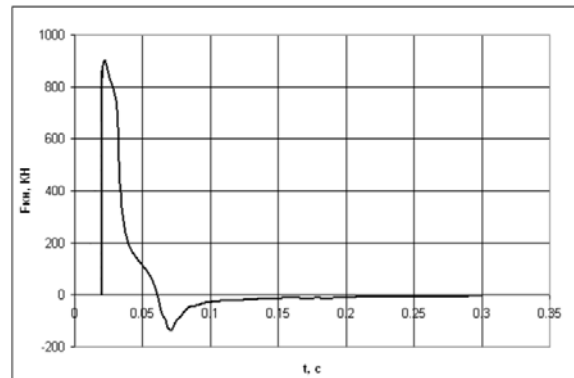


Рис. 7 Нагружающая сила (второй эксперимент)

Результаты по упрощенному подходу изображены на рис. 15,16,17,18 пунктирной линией. Значения скорости и перемещения, полученные традиционным методом, сильно отличаются от экспериментальных данных.

Для расчета динамики ПОУ ССО по предложенной методике, требуется решение серии трехмерных стационарных задач с целью уточнения гидравлических сопротивлений. Производится расчет гидравлических сопротивлений отверстий перфорированного цилиндра участка свободного отката (с.м. полости 1, 2, 3 на рис. 5) в пяти различных положениях откатных частей. Каждое из 5 решений соответствует определенному значению перемещения поршня (0 м, 0.06 м, 0.15 м, 0.24 м, 0.35 м). На рис. 8 и 9 представлены распределения давления и скорости в продольном сечении участка свободного отката в момент перемещения поршня на 0.15 м в фазе отката.

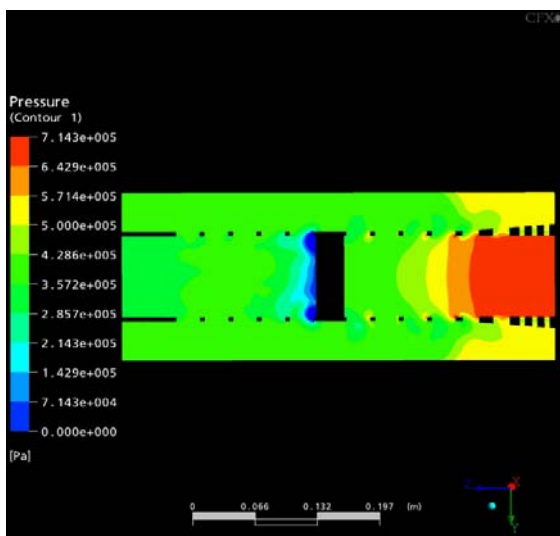


Рис. 8 Распределение давления в продольном сечении участка свободного отката, перемещение поршня 0.15 м

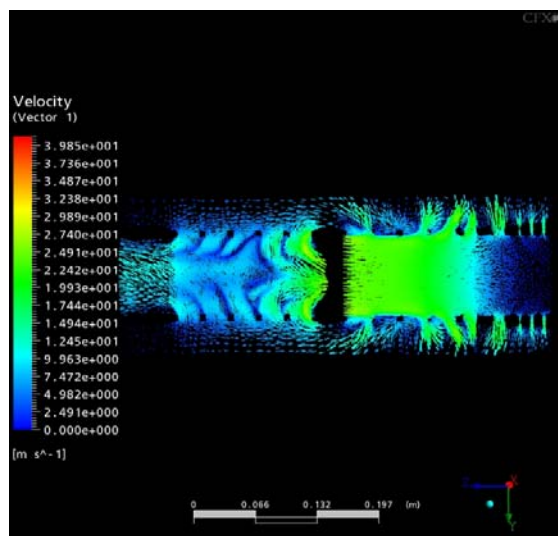


Рис. 9 Распределение скоростей в продольном сечении участка свободного отката, перемещение поршня 0.15 м

Гидравлические сопротивления системы отверстий при заданном положении поршня будут выглядеть следующим образом:

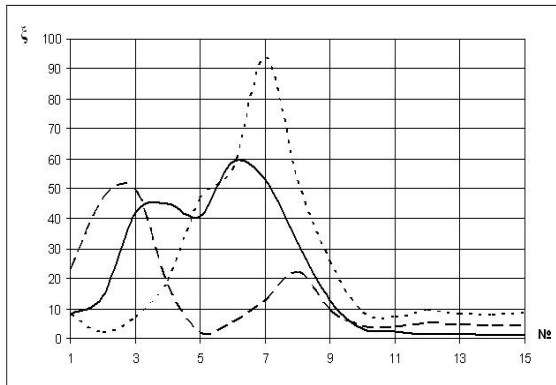


Рис. 10 Гидравлические сопротивления ξ_0, ξ_1, ξ_2 . ξ_0 – сплошная линия, ξ_1 – мелкая пунктирная линия, ξ_2 – крупная пунктирная линия

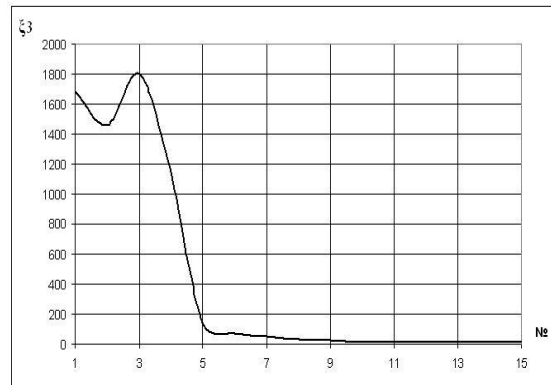


Рис. 11 Гидравлические сопротивления ξ_3

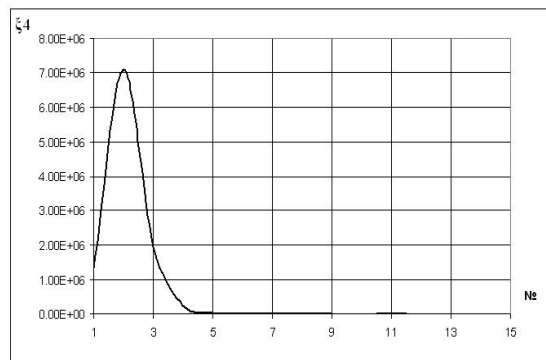


Рис. 12 Гидравлические сопротивления ξ_4

где № - номер отверстия, расположенного на образующей цилиндра вдоль его оси (нумерация ведется от начала траектории движения поршня); ξ_0, \dots, ξ_4 – гидравлические сопротивления отверстий, полученные при перемещениях поршня соответственно на 0, 0.06, 0.15, 0.24 и 0.35 м.

Далее производится численное моделирование процесса течения жидкости через отверстия, нанесенные на образующую внешнего цилиндра гидравлического тормоза. Внешний цилиндр изображен на рис. 5 в виде подобласти 5. Произведен расчет, каждое из 4 решений соответствует определенному положению поршня (0.04, 0.46, 1.02 и 1.365 м). На рис. 13 и 14 представлены распределения давления и скорости в продольном сечении внешнего цилиндра гидравлического амортизатора в момент перемещения поршня на 0.46 м в фазе отката.

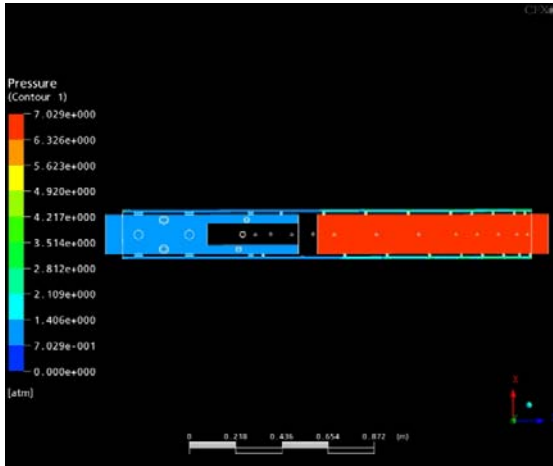


Рис. 13 Распределение давления в продольном сечении, перемещение поршня 0.46 м

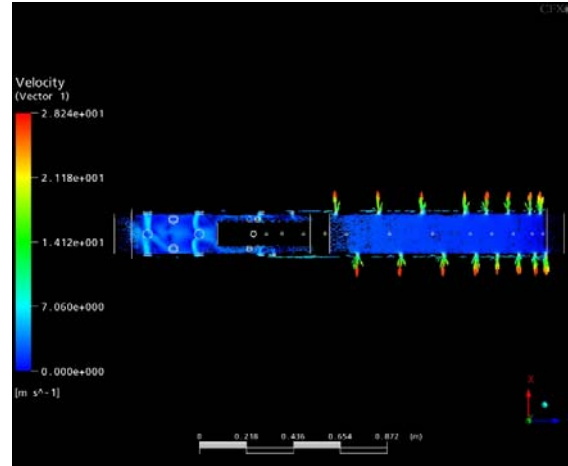


Рис. 14 Распределение скоростей в продольном сечении, перемещение поршня 0.46 м

Распределение гидравлических сопротивлений системы отверстий при заданном положении поршня будут выглядеть следующим образом:

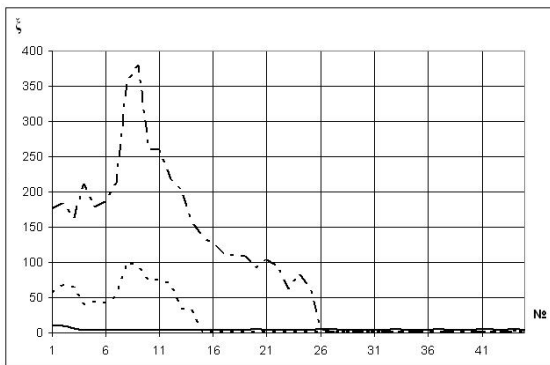


Рис. 15 Гидравлические сопротивления ξ_1, ξ_2, ξ_3 . ξ_1 – сплошная линия, ξ_2 – мелкаяпунктирная линия, ξ_3 – штрих – пунктирная линия.

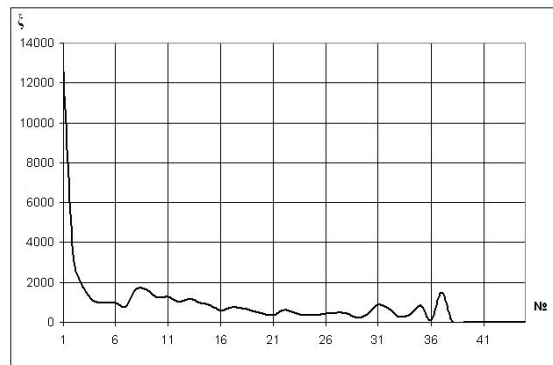


Рис. 16 Гидравлические сопротивления ξ_4

где № - номер отверстия, расположенного на образующей цилиндра вдоль его оси (нумерация ведется от начала движения поршня); ξ_1, \dots, ξ_4 – расчетные гидравлические сопротивления отверстий, полученные при перемещении поршня соответственно на 0.04, 0.46, 1.02 и 1.365 м. Используя полученные распределения гидравлических сопротивлений, производится новый расчет динамики ПОУ ССО. Проведено сравнение результатов решения с результатами, полученными по традиционной методике (с постоянными гидравлическими сопротивлениями), а также с результатами двух различных экспериментов, отличающихся различным уровнем и характером воздействия пороховых газов. На рис. 17 и рис. 18 представлены зависимости скорости и перемещения откатных частей от времени, полученных из эксперимента (сплошная линия), из расчета с постоянным гидравлическим сопротивлением отверстий (тонкая пунктирная линия) и расчета с переменными гидросопротивлениями (тонкая сплошная линия):

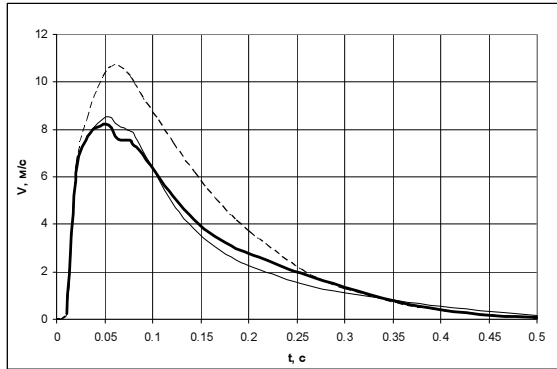


Рис. 17 Сравнение расчетных и экспериментальных скоростей (первый эксперимент)

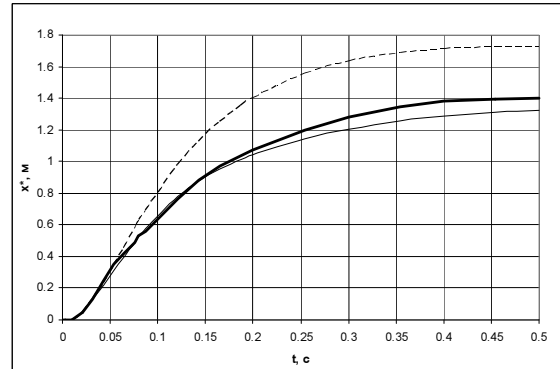


Рис. 18 Сравнение расчетных и экспериментальных перемещений (первый эксперимент)

Введение переменных гидравлических сопротивлений для отверстий, участвующих в перетоке жидкости дает существенное изменение характера движения откатных частей. Решение с уточненными значениями гидравлических сопротивлений намного точнее описывает процесс движения откатных частей, приближаясь к экспериментальным значениям.

Отличие максимума скорости, полученного по традиционной методике от экспериментального значения, составляет 2.49 м/с (30.3%). Разница максимумов скорости, полученных из расчета по новой методике и из эксперимента, составляет 0.34 м/с (4.1%). Отклонение максимума перемещения, полученного по традиционной методике от экспериментального значения, составляет 0.32 м (22.8%). Максимум перемещения, полученный из расчета по новой методике, отличается от эксперимента на 0.08 м (5.7%).

Проведено сравнение расчетов по традиционной и новой методике с результатами второго эксперимента для ССО. На рис.19 и рис.20 представлены зависимости скорости и перемещения откатных частей от времени, полученных из второго эксперимента (сплошная линия), из расчета с постоянным гидравлическим сопротивлением отверстий (тонкая пунктирная линия) и расчета с переменными гидросопротивлениями (тонкая сплошная линия):

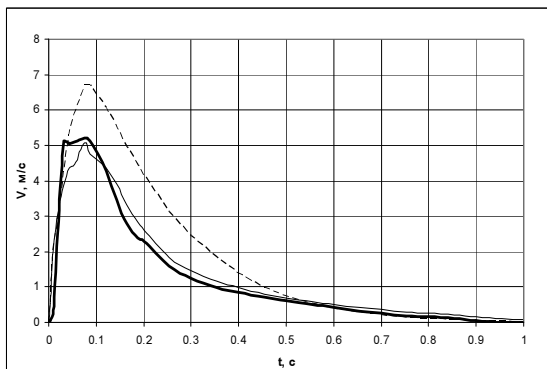


Рис. 19 Сравнение расчетных и экспериментальных скоростей (второй эксперимент)

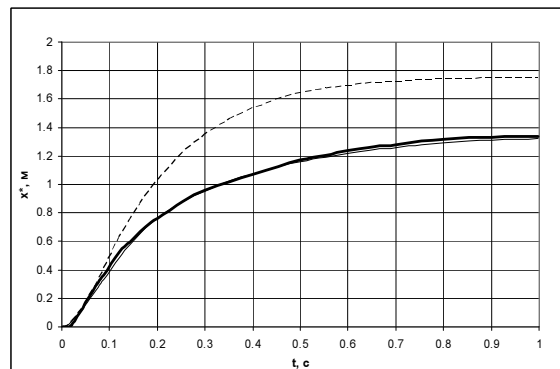


Рис. 20 Сравнение расчетных и экспериментальных перемещений (второй эксперимент)

Из представленных результатов следует, что расчетные значения, полученные по новой методике, хорошо приближаются к данным второго эксперимента. Отклонение максимальной скорости откатных частей, полученной по традиционной методике, от эксперимента составляет 1.49 м/с

(28.6%). Длина отката также дает большую ошибку - разница с экспериментом составляет 0.412 м (30.8%). Максимальная скорость откатных частей, полученная из расчета по новой методике, дает разницу с экспериментом 0.14 м/с (2.6%). Максимальная же длина отката отличается от экспериментального значения на 0.013 м (1%).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате численных исследований перетока жидкости через систему отверстий установлено, что:
 - для системы отверстий, нанесенных на стенки цилиндра по его образующей, происходит уменьшение гидравлического сопротивления всех отверстий по ходу течения жидкости;
 - для системы отверстий, нанесенных по длине окружности цилиндра, наблюдается равное уменьшение гидравлического сопротивления всех отверстий;
 - в случае отверстий, распределенных одновременно по длине перфорированного цилиндра и по его окружности, значения гидравлических сопротивлений существенно изменяются по сравнению с предыдущими случаями, что не позволяет выделить общую закономерность поведения гидравлических сопротивлений для произвольной геометрии;
 - при изменении динамической вязкости на порядок (с 0.0008899 кг/(м·с) до 0.0071631 кг/(м·с)), коэффициент гидравлического сопротивления меняется незначительно;
 - изменение скорости втекающего потока не вызвало существенного изменения коэффициентов гидравлического сопротивления (при числах Рейнольдса от 25000 до 225000).
2. Установлено, что одной из причин недостаточной точности традиционной методики расчета противооткатных устройств является упрощенное представление гидравлических сопротивлений в виде постоянных величин.
3. Разработана новая методика, алгоритм и программа расчета динамики высокоскоростных гидравлических демпферов, учитывающие взаимное влияние параметров потоков перетекающей жидкости. Описанная методика основана на композиции решения квазиодномерной динамической задачи движения откатных частей и решений серии стационарных трехмерных задач перетекания жидкости в рабочих сосудах.
4. Из серии расчетов гидравлических сопротивлений перфорированных цилиндров ПОУ ССО в трехмерной постановке построена зависимость распределения гидравлических сопротивлений отверстий перфорированных цилиндров от времени и от координаты положения поршней. Проведены расчеты динамики ПОУ ССО по традиционной и новой методике. Установлено существенное повышение точности решения по сравнению с традиционной методикой. Результаты численного расчета, полученные по новой методике, соответствуют экспериментальным данным.
5. Разработанные программные средства и результаты численных исследований использованы и внедрены в практику ОАО ЦНИИ «Буревестник»

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в рецензируемых изданиях из списка ВАК**

1. А.В. Кочетков, И.О. Савихин, В.В. Садовский. Моделирование работы противооткатных устройств с учетом стадии свободного отката // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 69. Нижний Новгород, Изд-во ННГУ. Межвуз. Сб., 2007. С. 159-169.
2. И.О. Савихин, В.В. Садовский. Численное исследование нестационарных процессов в противооткатных устройствах // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 72. Нижний Новгород, Изд-во ННГУ. Межвуз. Сб., 2010. С. 130-136.

Другие публикации

3. А.В. Кочетков, И.О. Савихин, В.В. Садовский. Математическое моделирование действия противооткатных устройств с учетом стадии свободного отката // Сборник докладов V Научной конференции ВРЦ РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения» в двух томах. Саров, 2008. Т.2. С. 904-914.
4. А.В. Кочетков, И.О. Савихин, В.В. Садовский. Численное моделирование работы гидротормоза с участком свободного отката // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы машиноведения». Нижний Новгород, 2006. С. 112-122.
5. А.В. Кочетков, И.О. Савихин, В.В. Садовский. Математическое моделирование работы противооткатных устройств с учетом стадии свободного отката // Сборник докладов V конференции молодых ученых. Нижний Новгород, 2006. С. 135-145.
6. А.В. Кочетков, И.О. Савихин, В.В. Садовский. Численное моделирование противооткатных устройств // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции «Нелинейные колебания механических систем», Нижний Новгород, 2008. Т.2. С. 76-77.
7. А.В. Кочетков, Г.К. Мишагин, И.О. Савихин, В.В. Садовский. Моделирование динамики высокоскоростных противооткатных устройств с использованием расчетных переменных коэффициентов гидравлического сопротивления // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования». Санкт-Петербург, 2008. Т.2. С. 33-34.
8. А.В. Кочетков, И.О. Савихин, В.В. Садовский. Численное моделирование динамики противооткатных устройств // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования». Санкт-Петербург, 2010. Т.1, С. 124-126.