

На правах рукописи

Остапенко Елена Николаевна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ОТКАТНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАСТРЕЛИВАНИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРУНТ**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Олег Геннадьевич Пенский.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Математическое обеспечение и применение электронно-вычислительных машин» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
Петр Петрович Макарычев;
доктор технических наук,
начальник отдела камер сгорания
ОАО «Авиадвигатель»
Алексей Матвеевич Сипатов.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Защита диссертации состоится 13 декабря 2016 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.188.08 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://www.pstu.ru>).

Автореферат разослан «___» октября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент

А.И. Швейкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время разработана математическая теория одноствольных артиллерийских орудий, предназначенных для застреливания строительных элементов в грунт на небольшие величины проникания. Орудия, разработанные на основе этой теории, успешно использовались при обустройстве нефтяных и газовых месторождений в Западной Сибири и Пермском крае, возведении легких фундаментов на территории г. Перми. Значительный вклад в разработку математических моделей динамики одноствольных строительных орудий внесли В.А. Гагин, С.М. Соколов, М.Ю. Цирульников, А.А. Бартоломей, В.Н. Григорьев, В.В. Маланин, О.Г. Пенский, А.В. Черников и др.

В.Н. Григорьевым и О.Г. Пенским, в частности, была создана математическая модель, основанная на термодинамической теории выстрела боевых орудий и позволяющая прогнозировать динамические характеристики, возникающие при выстреле из одноствольных строительных орудий, а также рассчитывать величины проникания застреливаемых строительных элементов в грунты, различные по своим физико-механическим свойствам. В работах В.В. Маланина, О.Г. Пенского и А.В. Черникова на основе созданных ими математических моделей и проведенных численных экспериментах показано, что наиболее эффективными и экономичными орудиями, предназначенными для застреливания строительных элементов в грунт, по сравнению с газодинамическими одноствольными орудиями являются откатные одноствольные орудия. А.В. Черниковым предложены математические модели динамики откатных одноствольных орудий, застреливающих сваи в грунт дна водоемов с учетом колебаний понтонов, с которых производится выстрел и расположенных на поверхности воды.

На основе математических моделей, численных экспериментов и натурных испытаний обосновано применение способа импульсного вдавливания при застреливании свай в грунты. Однако расчеты и практика использования откатных орудий показали, что из одноствольных орудий возможно застреливать сваи с помощью одного выстрела в плотные глинистые грунты на глубину не более четырех метров. Расчеты, проведенные на основе математических моделей, показали, что при многоимпульсном погружении свай даже из мощных одноствольных орудий нельзя заглубить сваю свыше 6 м.

Для увеличения глубины проникания В.В. Маланин, А.А. Проничев, О.Г. Пенский и А.Ю. Ракко предложили использовать разработанную ими многоствольную откатную артиллерийскую систему, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Принцип работы многоствольной артиллерийской системы следующий. Фигурный поршень 3 с платформой 2 вставляется в стволы 1. Платформа 2 опирается на строительный элемент 4, упирающийся на поверхность грунта 5. Во время выстрела платформа 2 давит на строительный элемент 4, в результате чего он проникает в грунт.

А.А. Проничевым и О.Г. Пенским разработаны математические модели, описывающие динамику многоствольных откатных орудий при условии, что

стволы, входящие в многоствольное орудие, обладают одинаковыми техническими характеристиками и условиями заряжания. Численные эксперименты показали возможность застреливания свай из таких многоствольных орудий в плотные глинистые грунты с помощью одного выстрела на глубину до 5,5 м, а с помощью многоимпульсного вдавливания на глубину до 30 м.

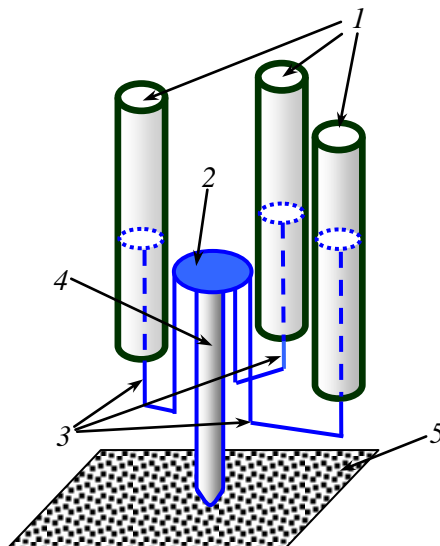


Рис.1. Принципиальная схема многоствольного артиллерийского орудия

Однако на практике для многоствольных орудий не всегда возможно выполнение условий строгого равенства технических характеристик и условий заряжания всех стволов, входящих в многоствольную систему. Отличие этих параметров друг от друга может привести к нежелательным явлениям во время выстрела, вплоть до поломки многоствольного орудия. Поэтому важно построить математические модели, описывающие динамику многоствольных артиллерийских орудий с разными техническими характеристиками стволов, входящих в многоствольную систему, разными условиями заряжания каждого из стволов, и предназначенных для погружения строительных элементов в грунт. Численные эксперименты, выполненные с использованием этих моделей, позволят прогнозировать кинематические и динамические характеристики многоствольных орудий во время выстрела, чтобы избежать нежелательных эффектов.

Целью диссертационного исследования является разработка математических моделей многоствольных откатных артиллерийских систем с разными техническими характеристиками и условиями заряжания стволов, входящих в систему, предназначенных для вертикального погружения строительных элементов в грунт.

В работе поставлены и решены следующие **основные задачи**:

– построить математическую модель системы «многоствольные откатные артиллерийские орудия — строительный элемент — грунт» с учетом выстрела при строго вертикальном положении строительного элемента и стволов системы;

– разработать с использованием построенных моделей методику, позволяющую определять возможность вертикального застреливания строительных элементов в грунт из многоствольных откатных артиллерийских

систем с разными техническими характеристиками стволов и условиями их заряжания;

- разработать алгоритмы и комплекс программ, позволяющие выполнять численные эксперименты на основе построенных математических моделей;
- провести верификацию математических моделей;
- используя численные эксперименты, исследовать поведение рассматриваемой системы «многоствольные откатные артиллерийские орудия — строительный элемент — грунт».

Методами исследования являются методы математического моделирования, включающие теоретический аппарат и эффективные алгоритмы теории обыкновенных дифференциальных уравнений, вычислительной математики, общей и прикладной механики, включая термодинамическую теорию выстрела и др. Численная реализация алгоритмов моделирования осуществлялась с помощью разработанного комплекса программ на языке программирования Object Pascal (среда Delphi 7.0) и на входном языке пакета Mathematica (версия 9.1).

Научная значимость диссертационной работы заключается в том, что впервые построена математическая модель, описывающая динамику многоствольных откатных артиллерийских систем с разными техническими характеристиками и условиями заряжания стволов, входящих в систему, при застреливании строительных элементов в грунт.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов обеспечена удовлетворительным соответствием результатов численных экспериментов, полученных на основе математического моделирования, и экспериментальных данных.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в создании комплекса программ для ЭВМ, позволяющего решать основную задачу внутренней баллистики многоствольных откатных артиллерийских орудий и корректировать условия заряжания стволов по наблюдаемым данным в процессе установки свай.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель выстрела при вертикальном застреливании строительных элементов в грунт из многоствольных откатных артиллерийских систем с разными техническими характеристиками стволов, входящих в систему, и условиями их заряжания.

2. Математическая модель для анализа динамики многоствольных откатных артиллерийских орудий с разными техническими характеристиками стволов, входящих в систему, и условиями их заряжания.

3. Математическая модель динамики двуствольной откатной артиллерийской системы с учетом отклонения стволов и строительного элемента от вертикали во время выстрела.

4. Комплекс программ для решения основной задачи внутренней баллистики многоствольных откатных артиллерийских орудий с разными техническими характеристиками стволов, входящих в систему, и условиями их заряжания.

5. Анализ результатов численного моделирования процесса выстрела при вертикальном застреливании строительных элементов в грунт из многоствольных откатных артиллерийских систем с разными техническими характеристиками стволов, входящих в систему, и условиями их заряжания.

Научная новизна исследований состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель внутренней баллистики многоствольных откатных артиллерийских систем, *отличающаяся от известных* тем, что предлагаемая модель позволяет описывать кинематические и динамические характеристики многоствольной откатной системы с различными техническими характеристиками и условиями заряжания стволов, входящих в эту систему, во время застреливания строительных элементов в грунт.

2. *Впервые* сформулировано необходимое условие отсутствия поворотных моментов при выстреле из многоствольной откатной артиллерийской системы.

3. *Впервые* предложена математическая модель расчета угла поворота двухствольной артиллерийской системы во время выстрела с различными условиями заряжания и техническими характеристиками стволов.

4. Разработан комплекс программ для ЭВМ, позволяющий решать основную задачу внутренней баллистики многоствольных откатных артиллерийских систем, *отличающийся от известных* тем, что комплекс позволяет выполнять расчеты для различных технических характеристик стволов, входящих в систему, и условий их заряжания.

5. *Впервые* разработана программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать угол поворота двухствольной откатной артиллерийской системы во время выстрела для различных технических характеристик и условий заряжания каждого ствола.

Апробация. Основные этапы работы докладывались на следующих конференциях: «Теория и практика современной науки» (XIV Международная научно-практическая конференция, г. Москва, 2–3 июля 2014 г.); «Science in the modern information society» (V Междунар. науч.-практ. конф., North Charleston, USA, 26–27 января 2015 г.); «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» (VI Междунар. научно-практ. конф., Санкт-Петербург, 20–21 февраля 2015 г.); «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (X Междунар. симпозиум, посвященный 70-летию Победы, г. Миасс, Россия, 8–10 сентября 2015 г.).

Работа полностью докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры механики сплошных сред и вычислительных технологий ПГНИУ (рук. д-р техн. наук, проф. В.Н. Аптуков и канд. физ.-мат. наук, доц. В.М. Пестренин), Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН д-р техн. наук, проф. В.П. Матвеев), кафедры механики композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (рук. д-р техн. наук, проф. А.Н. Аношкин), кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (рук. д-р физ.-мат. наук, проф. П.В. Трусов).

Основные результаты диссертационной работы были получены лично автором в ходе исследований (2013–2016 гг.), проводимых на кафедре процессов управления и информационной безопасности ПГНИУ, при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 2014/153 (проект № 2096).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены в ЗАО «Специальное конструкторское бюро» ПАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь). Материалы предлагаемой диссертационной работы включены в семестровый курс «Моделирование

импульсно-тепловых машин», читаемый на механико-математическом факультете Пермского государственного национального исследовательского университета.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 20 печатных изданиях: 1 монографии; 5 статьях в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, включая 1 статью в журнале, входящем в базу цитирования Scopus; 4 статьях в российских периодических изданиях, входящих в базу РИНЦ; 4 тезисах и материалах всероссийских и международных конференций; 3 патентах РФ на изобретения; 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора: постановка задачи (совместно с научным руководителем), разработка алгоритмов численной реализации математической модели, создание комплекса программ, проведение вычислений и анализ результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка. Диссертация изложена на 165 страницах, содержит 55 рисунков, 30 таблиц. Библиографический список включает 136 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении представлено обоснование актуальности исследования, отражены практическая значимость, научная новизна, цель и задачи исследования, приведены сведения об апробации работы и публикациях, краткое описание работы по главам и выводы по ним.

В первой главе описаны математические модели импульсных установок на основе артиллерийских орудий, предназначенных для застреливания строительных элементов в грунт, а также приведено описание самих установок. Представлены результаты современных исследований, в частности — принципиальная схема конструкции многоствольных строительных артиллерийских орудий. Проведенный анализ позволяет предполагать, что многоствольные откатные артиллерийские системы (МОАС) при решении задач строительства будут также эффективны, как одноствольные. Представлен обзор эмпирических и полуэмпирических способов определения силы сопротивления грунта движению в нем твердого тела.

Во второй главе рассматривается содержательная (парагр. 2.1), концептуальная (парагр. 2.2) и математическая (парагр. 2.3) постановка задачи моделирования МОАС при вертикальном погружении строительного элемента в грунт. Стволы, входящие в эту систему имеют разные технические характеристики и условия заряжания.

В парагр. 2.2 приведена концептуальная постановка задачи. Будем считать, что МОАС состоит из n стволов с разными техническими характеристиками: $M_i, L_{d,i}, d_i, W_{0,i}, p_{0,i}$, и разными условиями заряжания стволов $\omega_i, f_i, \alpha_i, \delta_i, I_{p,i}$, где i — порядковый номер ствола; M_i — масса i -го ствола; $L_{d,i}$ — длина канала i -го ствола; d_i — калибр i -го ствола; $W_{0,i}$ — объем камеры в i -м стволе; $p_{0,i}$ — давление форсирования в i -м стволе; ω_i — масса заряда в i -м стволе; f_i — величина силы пороха в i -м стволе; α_i —

коволном пороховых газов в i -м стволе; δ_i — плотность материала пороха в i -м стволе; $I_{k,i}$ — полный импульс давления пороховых газов (импульс пороха) в i -м стволе.

Известны параметры погружаемого строительного элемента: m, d_c, L_c где m — масса строительного элемента; d_c — диаметр строительного элемента; L_c — длина строительного элемента.

Требуется определить величину H проникания строительных элементов в грунт, а также основные характеристики строительной основной задачи внутренней баллистики: $p_i(t), \Psi_i(t), V_i(t), L_{p,i}(t), v_a(t), L_a(t)$ ($i = \overline{1, n}$), где $p_i(t)$ — давление пороховых газов в канале i -го ствола; $\Psi_i(t)$ — относительная часть (доля) сгоревшего заряда в i -м стволе; $V_i(t)$ — скорость отката i -го ствола; $L_{p,i}(t)$ — величина отката i -го ствола; $v_a(t)$ — скорость движения строительного элемента относительно поверхности земли (абсолютная скорость); $L_a(t)$ — закон движения центра масс строительного элемента относительно поверхности земли.

Процесс погружения строительного элемента осуществляется импульсным вдавливанием, т.е. в начальный момент строительный элемент опирается на поверхность грунта, а при выстреле происходит движение поршня в каналах стволов МОАС и строительного элемента в грунте.

Примем следующие допущения математической модели: 1) стволы орудий, входящих в МОАС, перед выстрелом направлены вниз под углом 90° к поверхности грунта; 2) стволы не имеют нарезов, что обеспечивает движение строительного элемента в грунте без вращения относительно его продольной оси; 3) орудия, входящие в МОАС, имеют разные технические характеристики и условия заряжания; 4) диаметр поршня в каждом стволе совпадает с его калибром; 5) движение поршня по каналу каждого ствола рассматривается до момента прохождения его «днища» через дульный срез ствола; 6) строительный элемент и поршень–забойник — недеформируемые тела; 7) во время выстрела отсутствует поворот строительного элемента и стволов относительно вертикальной оси; 8) первый период выстрела во всех стволах начинается одновременно; 9) сила сопротивления грунта $F(v_a(t), L_a(t))$ движению в нем строительного элемента описывается гладкой функцией от времени, модуль производной которой ограничен, где $v_a(t)$ и $L_a(t)$ — скорость движения и величина погружения строительного элемента в грунт соответственно; 10) справедливы допущения термодинамической теории выстрела.

В парагр. 2.3 приведена математическая постановка задачи. Предварительный период выстрела для каждого ствола описывается следующей формулой

$$\text{внутренней баллистики: } \Psi_{0,i} = \frac{\frac{1}{\Delta_i} - \frac{1}{\delta_i}}{\frac{f_i}{p_{0,i}} + \alpha_i - \frac{1}{\delta_i}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad \text{где } \Delta_i = \frac{\omega_i}{W_{0,i}}$$

заряжания, $\omega_i, W_{0,i}, \delta_i, f_i, p_{0,i}, \alpha_i$ — масса заряда, объем каморы, плотность пороха, сила пороха, давление форсирования, коволном пороховых газов в стволе i .

На основе уравнения Резаля, геометрического закона горения пороха и законов классической механики получены уравнения, описывающие первый период выстрела ($\Psi_{0,i} \leq \Psi_i < 1$) в каждом стволе:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{p_i \cdot \left[\left(\frac{f_i \omega_i}{S_i} + p_i \cdot a_{1,i} \right) \cdot \Gamma_i - (v_a + V_i) \cdot (1 + \theta_i) \right]}{L_{\Psi,i} + L_a + L_{p,i}}, \quad (1)$$

$$m \frac{dv_a}{dt} = mg - F(v_a, L_a) + \sum_{i=1}^n p_i S_i, \quad (2)$$

$$M_i \frac{dV_i}{dt} = -M_i g - G_i(V_i, L_{p,i}) + p_i S_i, \quad (3)$$

$$\frac{dL_a}{dt} = v_a, \quad (4)$$

$$\frac{dL_{p,i}}{dt} = V_i, \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = \frac{1}{I_{k,i}} p_i = \Gamma_i p_i, \quad (6)$$

где $L_{\Psi,i} = \frac{W_{\Psi,i}}{S_i} = \frac{1}{S_i} \left[W_{0,i} - \frac{\omega_i}{\delta_i} (1 - \Psi_i) - \alpha_i \omega_i \Psi_i \right]$ — приведенная длина каморы

в i -м стволе; $a_{1,i} = \frac{\omega_i}{S_i} \left(\alpha_i - \frac{1}{\delta_i} \right) = const$; $\Gamma_i = \frac{1}{I_{k,i}}$ — удельная интенсивность

газообразования, $I_{k,i}$ — импульс пороха в i -м стволе, $i = \overline{1, n}$.

Начальные условия для решения системы уравнений (1)–(6) имеют вид

$$\begin{cases} p_i(0) = p_{0,i}, & v_a(0) = 0, & V_i(0) = 0, \\ L_a(0) = 0, & L_{p,i}(0) = 0, & \Psi_i(0) = \Psi_{0,i}, \end{cases} \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

Второй период ($\Psi_i = 1$ и $L_{p,i} + L_a \leq L_{d,i}$, где $L_{d,i}$ — длина канала i -го ствола) выстрела каждого ствола предлагается описывать следующими уравнениями (2)–(5) и уравнением

$$p_i = p_{k,i} \left(\frac{L_{1,i} + L_{a,k,i} + L_{p,k,i}}{L_{1,i} + L_a + L_{p,i}} \right)^{1+\theta_i}, \quad L_{1,i} = \frac{W_{0,i}}{S_i} (1 - \Delta_i \alpha_i), \quad i = \overline{1, n} \quad (8)$$

где $L_{1,i}$ — приведенная длина каморы в i -м стволе при $\Psi_i = 1$, индексом k обозначены параметры в конце первого периода выстрела: $p_{k,i}$ — давление в стволе i , $L_{p,k,i}$ — величина отката ствола i , $L_{a,k,i}$ — абсолютный путь поршня в стволе i .

Начальные условия для этой системы уравнений имеют вид:

$$\begin{cases} v_a(t_{k,i}) = v_{a,k,i}, & V_i(t_{k,i}) = V_{k,i}, \\ L_a(t_{k,i}) = L_{a,k,i}, & L_{p,i}(t_{k,i}) = L_{p,k,i}, \end{cases} \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где индексом k обозначены параметры в конце первого периода выстрела: $t_{k,i}$ — время окончания первого периода выстрела в стволе i ; $v_{a,k,i}$ — абсолютная скорость поршня в стволе i ; $V_{k,i}$ — скорость отката ствола i ; $L_{a,k,i}$, $L_{p,k,i}$ — абсолютный путь поршня и величина отката ствола i .

Во время выстрела МОАС с разными техническими характеристиками и условиями заряжания время окончания первого и начала второго периода выстрела в разных стволах может не совпадать. Поэтому расчеты с помощью приведенных уравнений внутренней баллистики нужно выполнять согласно правилам: 1) если для орудия i выполняется условие $\Psi_i(t) < 1$, то для описания внутрибаллистических процессов решается задача Коши для первого периода; 2) если $\Psi_i(t) = 1$ и $L_{p,i} + L_a \leq L_{d,i}$, то решается задача Коши для второго периода, где $L_{d,i}$ — длина канала i -го ствола. Если $L_{p,i} + L_a > L_{d,i}$, то давление газов в i -м стволе стало равно атмосферному давлению, и они больше не оказывают влияние на движение строительного элемента.

На завершающем этапе, после выхода поршня-забойника из всех каналов стволов, движение строительного элемента в грунте описывается задачей Коши:

$$\begin{cases} m \frac{dv_a}{dt} = mg - F(v_a, L_a), & \frac{dL_a}{dt} = v_a, \\ v_a(t_{d,N}) = v_{a,d,N}, & L_a(t_{d,N}) = L_{a,d,N}, \end{cases} \quad (10)$$

где N — номер ствола, из которого поршень-забойник вышел последним, индексом d обозначены параметры в конце второго периода выстрела; $t_{d,N}$ — время окончания второго периода выстрела в стволе N ; $v_{a,d,N}$ — абсолютная скорость поршня-забойника в момент его выхода из канала ствола N ; $L_{a,d,N}$ — абсолютный путь поршня-забойника по каналу ствола N в суммарное время первого и второго периодов выстрела.

Очевидно, что величина проникания H строительного элемента в грунт соответствует значению $L_a(T)$, при котором выполняется равенство $v_a(T) = 0$.

В **парагр. 2.4** даны понятия различных способов застреливания строительных элементов и определение силы сопротивления грунта в зависимости от этого.

Для импульсного вдавливания:

$$F(v_a, L_a) = S_c (a_0 v_a^2(t) + b_0) + c_0 P_c L_a(t),$$

где S_c и P_c — площадь и периметр миделевого сечения строительного элемента соответственно; a_0 и b_0 — коэффициенты динамической и статической составляющих силы сопротивления грунта; c_0 — удельная сила трения боковой поверхности строительного элемента о грунт; $v_a(t)$ и $L_a(t)$ — абсолютная скорость движения и величина погружения строительного элемента в грунт соответственно.

Для свободного застреливания и полужастреливания:

$$F(v_a, L_a) = \begin{cases} S_c (a_0 v_a^2(t) + b_0) + c_0 P_c (L_a(t) - L_s), & \text{при } L_a \geq L_s, \\ 0, & \text{при } L_a < L_s. \end{cases}$$

где L_s — расстояние от нижней части строительного элемента до поверхности грунта. Величина погружения строительного элемента в грунт определяется по формуле $H = L_a(T) - L_s$.

В случае многоимпульсного вдавливания сила сопротивления грунта движению в нем строительного элемента будет описываться формулой

$$F(v_a, L_a) = \begin{cases} S_c (a_0 v_a^2(t) + b_0) + c_0 P_c (L_a(t) + X_j), & \text{при } L_a(t) + X_j \leq L_c, \\ S_c (a_0 v_a^2(t) + b_0) + c_0 P_c L_c, & \text{при } L_a(t) + X_j > L_c. \end{cases}$$

где L_c — длина строительного элемента; X_j — заглубление строительного элемента в грунт в результате j -го вдавливания ($j = \overline{1, K}$). Очевидно, что величина проникания строительного элемента в грунт в результате одного импульса соответствует значению $L_a(T_j)$, где T_j — время погружения во время j -го импульса, при котором выполняется равенство $v_a(T_j) = 0$ и $X_j = X_{j-1} + L_a(T_j)$, где $X_0 = 0$. Величина погружения строительного элемента в результате K -импульсного вдавливания равна $H = X_K$.

В **парагр. 2.5** описана процедура и приведены результаты идентификации параметров системы. На основе численных экспериментов показана возможность использования разработанных математических моделей для прогнозирования и анализа поведения системы во время и после застреливания строительного элемента и его проникания в грунт после выхода поршня-забойника из каналов стволов. Так, с помощью одиночного импульсного вдавливания из трехствольной откатной артиллерийской системы сваю можно погрузить в глинистый грунт с консистенцией 0,3 д.е. на глубину 5,7 м, а с помощью многоимпульсного вдавливания — более 50 м при условии однородности грунта.

Частные случаи общей математической модели приведены в **парагр. 2.6**. Отмечено, что математическая модель, описывающая внутреннюю баллистику МОАС с одинаковыми техническими характеристиками и условиями заряжания стволов, является частным случаем модели приведенной в гл. 2, а при выполнении условия $n = 1$ получаем уравнения, описывающие динамику выстрела из одноствольного орудия.

Проведенная верификация (**парагр. 2.7**) показала, что предложенная математическая модель МОАС с разными техническими характеристиками и условиями заряжания, предназначенная для застреливания строительных элементов в грунт, адекватно отражает реальный технический процесс, по крайней мере, для одноствольного откатного строительного орудия.

В **третьей главе** представлены результаты численных экспериментов с использованием разработанной в гл. 2 математической модели, проведен анализ чувствительности математической модели от ее входных параметров.

В **парагр. 3.1** численными экспериментами на примере трехствольной артиллерийской системы показано, что малому изменению входных параметров модели (на 1%) соответствует малое отклонение результатов решения основной задачи внутренней баллистики МОАС (на величину не более 4%). Наиболее чувствительными величинами оказались максимальные давления газов в каналах стволов и дульные скорости свободных откатов стволов, входящих в МОАС. Это позволяет использовать предложенную модель при решении

основной задачи внутренней баллистики откатных орудий, применяемых в строительстве при застреливании свай.

В **парагр. 3.2** приведены результаты численного однопараметрического анализа на примере трехствольной системы, показана эффективность применения откатных артиллерийских орудий при застреливании строительных элементов в грунт, выявлены основные качественные зависимости внутрибаллистических характеристик от входных параметров основной задачи внутренней баллистики. Показано, что применять многоствольные орудия для погружения строительных элементов в грунт эффективно.

Анализ качественных зависимостей основных параметров решения основной задачи внутренней баллистики от количества стволов с одинаковыми характеристиками приведен в **парагр. 3.3** диссертационной работы.

Показано преимущество МОАС по сравнению с одноствольным орудием для погружения строительного элемента способом импульсного вдавливания. Например, с увеличением количества стволов в МОАС максимальное давление в каналах стволов уменьшается на 78,9% для пятиствольной системы по отношению к одноствольному орудью, дульная скорость отката уменьшается до 62,7%, а величина проникания строительного элемента в грунт увеличивается на 59,8%.

В **парагр. 3.4** подтверждено преимущество импульсного вдавливания строительного элемента в грунт по сравнению со свободным застреливанием сваи и для МОАС. Например, для строительного элемента диаметром 0,268 м относительное увеличение проникания при импульсном вдавливании по сравнению со свободным застреливанием из шестиствольной артиллерийской системы составляет 74,3%

С учетом результатов работ И.Г. Русяка и В.М. Ушакова для решения поставленной задачи использовался метод Рунге–Кутты 4–го порядка с шагом 10^{-6} с. Для численных расчетов был разработан комплекс программ на языке программирования Object Pascal (среда Delphi 7.0) и программа на входном языке пакета Mathematica (версия 9.1). Описание комплекса программ и обоснование его разработки приведено **парагр. 3.5**. Даны рекомендации по его использованию.

Четвертая глава диссертации посвящена созданию моделей анализа МОАС.

В **парагр. 4.1** приведен аналитический способ расчета длительности предварительных периодов выстрела МОАС.

Пусть ранее введенные допущения справедливы и известны значения давлений форсирования $p_{0,i}$, $i = \overline{1, n}$ в каждом из стволов. Дополнительно примем, что $f_i = f$, $\alpha_i = \alpha$, $\delta_i = \delta$, $\theta_i = \theta$, $i = \overline{1, n}$.

В диссертации предлагается формула для расчета продолжительности $t_{0,i}$ предварительного периода в каждом из стволов:

$$t_{0,i} = \frac{I_{k,i} \cdot \left[\left(1 - \frac{\Delta_i}{\delta} \right) \ln \frac{\Psi_{0,i}}{\Psi_i(0)} - \Delta_i \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) (\Psi_{0,i} - \Psi_i(0)) \right]}{f \Delta_i}, \quad \Psi_i(0) = \frac{\frac{1}{\Delta_i} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p_g} + \alpha - \frac{1}{\delta}},$$

где $i = \overline{1, n}$, p_g – давление газов воспламенителя.

Выполнена верификация полученных результатов. Приведен алгоритм подбора параметров заряжания стволов для синхронизации продолжительности предварительных периодов выстрела и пример его применения.

При построении математических моделей, рассмотренных в гл. 2 одним из важных допущений было допущение об отсутствии поворотных моментов стволов и строительного элемента относительно вертикальной оси застреливания. В **парагр. 4.2** предложены способы размещения стволов МОАС, которые устраняют поворотные моменты при выстреле. Выведено необходимое условие вертикального застреливания строительных элементов грунт из МОАС.

При работе МОАС важно, чтобы во время выстрела не возникали моменты сил, способные развернуть строительный элемент относительно вертикали. При условии, что плечи поршня-забойника, который при выстреле толкает строительный элемент вниз, равны, необходимое условие отсутствия моментов можно записать в виде соотношения

$$M_i = \frac{1}{\gamma_i \left(\frac{1}{M_1} + \frac{n}{m} \right) - \frac{n}{m}}, \quad \gamma_i = \frac{L_{1,i} + L_{a,k,i} + L_{p,k,i}}{L_{1,1} + L_{a,k,1} + L_{p,k,1}}, \quad i = \overline{2, n},$$

где M_i — масса i -го ствола; m — масса сваи; $L_{1,i}$ — приведенная длина камеры в i -м стволе при $\Psi_i = 1$; индексом k обозначены параметры в конце первого периода выстрела: $p_{k,i}$ — давление в стволе i , $L_{p,k,i}$ — величина отката ствола i , $L_{a,k,i}$ — абсолютный путь поршня в стволе i .

Приведен пример применения необходимого условия вертикального застреливания строительного элемента в грунт при отсутствии первого периода выстрела и задача подбора условий заряжания, чтобы стволы можно было объединить в одну систему.

В **парагр. 4.3** предложена математическая модель, позволяющая вычислять поворот двухствольного артиллерийского орудия при устранении допущения гл. 1 об отсутствии поворотных моментов относительно вертикали во время выстрела. Так же, как и в парагр. 4.2 предполагается, что во внутрибаллистических процессах выстрела каждого из орудий обязательно имеется второй период выстрела, который обеспечивает отсутствие выброса пламени из стволов при выходе из них поршня.

Поместим двухствольное орудие в неподвижную декартову систему координат Oxy так, как изображено на рис. 2, и введем следующие обозначения: B, D — центры масс стволов, a — половина ширины поршня-забойника, b — общая высота поршня-забойника и застреливаемой сваи («вилки»), L_d — длина канала ствола (будем предполагать, что длины обоих каналов стволов одинаковы), C — центр массы «вилки», d — величина определяющая положение центра масс «вилки» относительно нижней части строительного элемента.

Рассматриваемая система имеет пять степеней свободы. Введем следующие обобщенные координаты: φ — угол между горизонталью и свай; q_1 — смещение ствола первой пушки относительно «вилки»; q_2 — смещение ствола

второй пушки относительно «вилки»; x_A — смещение нижнего конца сваи по горизонтали от цели; y_A — смещение сваи по вертикали.

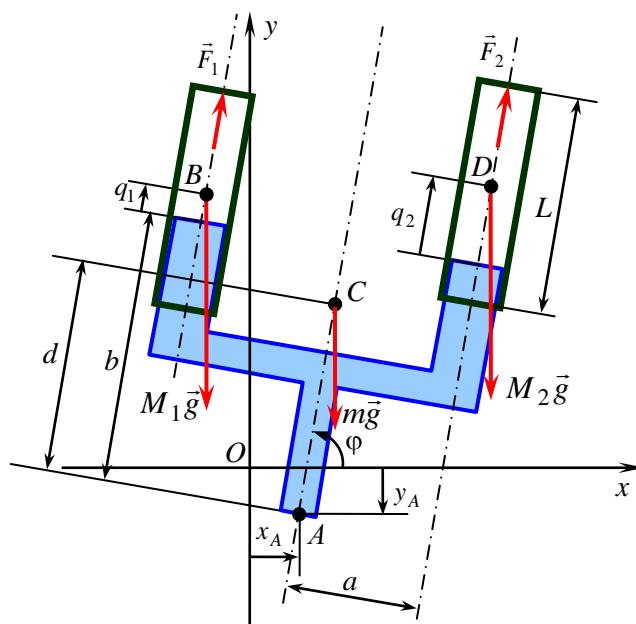


Рис. 2. Принципиальная схема двуствольной артиллерийской системы

Для построения математической модели применялись уравнения Лагранжа второго рода, на основе которых с помощью специально разработанной программы в среде пакета Mathematica с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка были проведены численные расчеты.

Показано, что тяжелые двуствольные артсистемы можно применять для застреливания элементов в грунт при условии отсутствия необходимости строго вертикального проникания строительного элемента в грунт. Например, при отсутствии возгорания пороха в одном из стволов тяжелой двуствольной артсистемы среднее отклонение строительного элемента от вертикали составляет $4,7^\circ$, а среднее квадратическое отклонение — $2,1^\circ$, что позволяет избежать поломки орудия при выстреле. Также из проведенного численного эксперимента можно сделать вывод, что поршень-забойник должен иметь размеры, обеспечивающие малые углы поворота. Эти размеры можно вычислить на основе вышеприведенной математической модели.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1. Разработана математическая модель многоствольных откатных артиллерийских орудий, отличающаяся от известных тем, что модель предусматривает различие в технических характеристиках стволов, входящих в эти орудия, и условиях их заряжания.

2. Предложены новые математические способы проведения вычислительного экспресс-анализа для определения возможности вертикального застреливания свай из многоствольных откатных орудий.

3. Разработан комплекс программ для ЭВМ для решения основной задачи внутренней баллистики многоствольных откатных артиллерийских систем с

разными техническими характеристиками стволов и условиями их заряжания, предназначенных для одноимпульсного и многоимпульсного застреливания строительных элементов в грунт.

4. Численными экспериментами показана возможность применения многоствольных откатных артиллерийских систем при решении задач строительства, когда возникает необходимость быстрого погружения свай с помощью одного выстрела на глубину около 6 м.

5. Численными экспериментами показана принципиальная возможность застреливания свай с помощью многоимпульсного вдавливания на глубину около 50 м.

6. Результаты математического моделирования застреливания строительных элементов из многоствольных откатных артиллерийских орудий внедрены при проведении НИР в ЗАО «Специальное конструкторское бюро» ПАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь) и при чтении курса «Моделирование импульсно-тепловых машин» на механико-математическом факультете Пермского государственного национального исследовательского университета.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Маланин, В.В. Принципиальные схемы и математические модели строительных артиллерийских орудий / В.В. Маланин, Е.Н. Остапенко, О.Г. Пенский, А.В. Черников. — Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2016. — 498 с.

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий

2. Маланин, В.В. Необходимое условие вертикального застреливания строительных элементов в грунт из многоствольной артиллерийской системы / В.В. Маланин, Е.Н. Остапенко, О.Г. Пенский // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 1.

3. Остапенко, Е.Н. Аналитический способ расчета предварительных периодов выстрела многоствольной строительной артиллерийской системы / Е.Н. Остапенко // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 6–1. — С. 38–40.

4. Маланин, В.В. Научные разработки в области строительных откатных артиллерийских орудий и их математические модели / В.В. Маланин, Е.Н. Остапенко, О.Г. Пенский // Вестник машиностроения. 2015. № 6. С. 82–85. (переводная: Malanin, V.V. Explosive Pile Drivers / V.V. Malanin, Е.Н. Ostapenko, O.G. Penskiy // Russian Engineering Research. — 2015. — Vol. 35, — № 9. — P. 682–685). (база Scopus)

5. Остапенко, Е.Н. Исследование математической модели импульсного вдавливания строительных элементов в грунт из многоствольных откатных артиллерийских орудий / Е.Н. Остапенко // Фундаментальные исследования. 2016. № 3-1. С. 42–46.

6. Маланин, В.В. Комплекс программ для расчета динамики строительных артиллерийских систем / В.В. Маланин, Е.Н. Остапенко, О.Г. Пенский // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 3–1. — С. 55–59.

Охранные документы на объекты интеллектуальной собственности

7. Пат. № 2543002 С1, Российская Федерация, МПК E02D 7/02. Поршень-забойник для многоствольных строительных артиллерийских орудий / Остапенко Е.Н., Пенский О.Г., Черников А.В. — № 2013136812/03; заявл. 06.08.2013; — опубл. 27.02.2015, Бюл. № 6.

8. Пат. № 2551042 С1, Российская Федерация, МПК E02D 7/02. Способ размещения артиллерийских орудий в многоствольной строительной артиллерийской системе / Маланин В.В., Остапенко Е.Н., Пенский О.Г. — № 2014116303/03; заявл. 22.04.2014; — опубл. 20.05.2015, Бюл. № 14.

9. Пат. № 2571779 С2, Российская Федерация, МПК E02D 7/00. Устройство погружения строительных элементов в грунт / Черников А.В., Пенский О.Г., Остапенко Е.Н. — № 2013134055/03; заявл. 19.07.2013; — опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35.

10. Св. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2014615753, Российская Федерация. Решение основной задачи внутренней баллистики многоствольных строительных артиллерийских систем / Остапенко Е.Н. — № 2014613619; заявл. 22.04.2014; — опубл. 20.06.2014, Бюл. № 6.

11. Св. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2014617268, Российская Федерация. Программа расчета угла поворота дуствольной строительной артиллерийской системы при застреливании свай в грунт / Лутманов С.В., Остапенко Е.Н. — № 2014614849; заявл. 23.05.2014; — опубл. 20.08.2014, Бюл. № 8.

12. Св. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2015614924, Российская Федерация. Решение основной задачи внутренней баллистики многоимпульсного погружения строительных элементов из многоствольных строительных артиллерийских систем при заданной величине первоначального проникания сваи в грунт / Остапенко Е.Н. — № 2015611417; заявл. 06.03.2015; — опубл. 20.06.2015, Бюл. № 6.

Публикации в прочих изданиях

13. Пенский, О.Г. Уравнения энергетического баланса многоствольных строительных откатных артиллерийских систем / О.Г. Пенский, Е.Н. Остапенко, А.В. Черников // Вестник Пермского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. — Пермь, 2013. — Вып. 1(13). — С. 34–37.

14. Маланин, В.В. Математическая модель дуствольной строительной артиллерийской системы / В.В. Маланин, С.В. Лутманов, Е.Н. Остапенко // Вестник Пермского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. — Пермь, 2014. — Вып. 3(26). — С. 42–47.

15. Остапенко, Е.Н. Математическая модель многоствольной строительной артиллерийской системы / Е.Н. Остапенко // Проблемы механики и управления: Нелинейные динамические системы: межвуз. сб. науч. тр. — Пермь, 2014. — Вып. 46. — С. 107–115.

16. Остапенко, Е.Н. Откатные строительные пушки от прошлого до настоящего Е.Н. Остапенко // Вестник Пермского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. — Пермь, 2015. — Вып. 2(29). — С. 46–51.

Подписано в печать 12.10.2016. Формат 60×84/16
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 116

Типография Издательского центра ПГНИУ
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15