

УДК 531.57

## КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ

Маланин В.В., Остапенко Е.Н., Пенский О.Г.

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,  
Пермь, e-mail: ostapenko@psu.ru

Решение задач проектирования артиллерийских систем, которые можно применять в строительной практике и которые представляют собой новый класс строительных артиллерийских машин, требует создания необходимых программных приложений. В статье описан комплекс программ, предназначенный для решения основной задачи внутренней баллистики многоствольных откатных артиллерийских пушек, предназначенных для вертикального погружения строительных элементов в грунт. Комплекс основан на математических моделях импульсного погружения недеформируемых тел в сплошную среду. Комплекс работает под управлением операционных систем не ниже Windows XP. В статье обосновано использование комплекса для решения задач практики в полевых условиях при проведении строительных работ, обусловленных необходимостью применения компьютеров с небольшими вычислительными мощностями и объемами памяти. Время выполнения описанных программ комплекса не превышает 8 с.

**Ключевые слова:** программный комплекс, проникание, основная задача внутренней баллистики, артиллерийские орудия, строительство

## SOFTWARE PACKAGE FOR CALCULATION OF DYNAMICS OF CONSTRUCTION ARTILLERY SYSTEMS

Malanin V.V., Ostapenko E.N., Penskiy O.G.

Perm State University, Perm, e-mail: ostapenko@psu.ru

This paper is devoted to solution of problems of specialized recoiling guns' designing. These guns can be used in a construction practice, represent a new class of building artillery machines and require a development of the necessary software applications. The paper describes a program package that was designed to solve the basic problem of the internal ballistics of multibarrel recoiling guns. These guns are intended for vertical dive piles into the ground. The package is based on mathematical models of pulsed stamping non-deformable bodies in continuous medium and is designed to run in the environment of operating systems not older than Windows XP. In the paper, advantages of our package using are demonstrated in comparison with existing mathematical packages designed for solving the initial value problems for systems of ordinary differential equations. The paper substantiates a usage of the package for solution of practical problems in the field during construction that requires to use computers with a low processing power and memory. Execution time of the programs package does not exceed 8 s.

**Keywords:** software program package, penetration, the main task of the internal ballistics, artillery, construction

В работах [2, 4] предложены математические модели, описывающие динамику многоствольных строительных откатных артиллерийских орудий с разными техническими характеристиками и условиями заряжания стволов, составляющих эти орудия [5]. Разработка компьютерных программ, в основу которых положены расчеты по этим математическим моделям, актуальна в связи с необходимостью определения возможности использования строительных пушек при застреливании свай в грунт на заданную глубину.

В работах [3, 7] описана программа решения основной задачи внутренней баллистики одноствольных откатных орудий, предназначенных для застреливания строительных элементов в грунт, в работе [10] предложена программа решений этой задачи для многоствольных откатных орудий с одинаковыми техническими характеристиками стволов и условиями заряжания.

Настоящая статья посвящена описанию комплекса программ, основанного на

математических моделях [2, 4] и предназначенного для решения основной задачи внутренней баллистики [6] многоствольных откатных строительных систем при условиях отсутствия поворотных моментов у стволов во время выстрела [1] и представления силы сопротивления грунта движению строительных элементов в виде, предложенном в работе [3].

### Описание интерфейса и функционирования комплекса программ

Принципиальная схема многоствольной строительной артиллерийской установки [5] изображена на рис. 1.

Работает установка следующим образом. В стволы 1 вставляется фигурный поршень 3 с платформой 2, которая опирается на строительный элемент 4, упирающийся на поверхность грунта 5. Во время выстрела платформа 2 давит на сваю 4, в результате свая проникает в грунт.

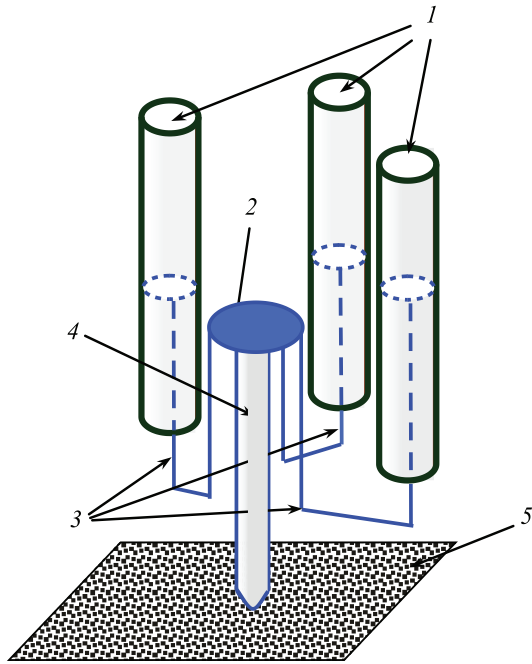


Рис. 1. Принципиальная схема многоствольной строительной артиллерийской установки

Комплекс, позволяющий рассчитывать динамические характеристики многоствольной строительной артиллерийской системы во время выстрела, состоит из двух программ. Первая программа предназначена для решения основной задачи свободного застре-

ливания, полустастреливания и импульсного вдавливания строительных элементов в грунт с помощью одного выстрела многоствольной откатной артиллерийской системы [8], вторая программа требуется для расчетов динамики многоимпульсного погружения [9].

Разработка двух программ продиктована необходимостью создания удобств пользователям при решении практических задач, которые обусловлены тем, что на практике для погружения строительных элементов в грунт производился один выстрел, а поэтому в полевых условиях, например, где также возможно применение первой программы, необходимо использовать количество входных параметров модели одного выстрела. Расчет многоимпульсного погружения требует входных параметров модели больше, чем расчет одного выстрела.

На рис. 2 приведена главная форма программы, предназначенной для решения строительной основной задачи внутренней баллистики многоствольных артиллерийских орудий при отсутствии поворотных моментов относительно оси застреливания строительного элемента для единичного выстрела.

Структура входного файла данных в формате \*.txt (рис. 3, а) понятна из пояснений, приведенных на рис. 2. Все входные данные и результаты вычислений приводятся в международной системе СИ.

Рис. 2. Главная форма программы расчета единичного выстрела после выполнения

3						
3422	2000000	35000	0			
0.168	360					
0.308	0.001026	2000000	0.170	376500	3600	2.345
0.256	0.001026	2000000	0.170	376500	3600	2.345
0.308	0.001026	2000000	0.170	376500	3600	2.345

а

```

ОРУДИЕ 1 sc= 0.00
pmax= 70360505 vp= 3.80 lp=0.06
psi=1.00 pd= 2790407

ОРУДИЕ 2 sc= 0.00
pmax= 29622694 vp= 1.76 lp=0.05
psi=0.91 pd= 2699660

ОРУДИЕ 3 sc= 0.00
pmax= 70360505 vp= 3.80 lp=0.06
psi=1.00 pd= 2790407

la= 2.30 va= 65.80

Проникание в грунт: 5.44
    
```

б

Рис. 3. Файл входных данных (а) и файл результатов (б) программы решения основной задачи внутренней баллистики на примере трехствольной откатной строительной артиллерийской системы

В результате работы программы вычисленная величина проникания застреливаемого строительного элемента выводится на главную форму программы (рис. 2), основные характеристики решения основной задачи внутренней баллистики – в файл \*.txt, заданный на главной форме программы перед выполнением расчетов.

На рис. 3, б изображен файл результатов со следующими обозначениями: sc – расстояние от конца строительного элемента до поверхности грунта перед вы-

стрелом; pmax – максимальное давление в канале ствола во время выстрела; vp, lp – скорость свободного отката и путь отката ствола в конце выстрела соответственно; psi, pd – относительная часть сгоревшего пороха к моменту выхода строительного элемента из канала ствола, дульное давление в стволе; la, va – абсолютное перемещение строительного элемента в момент его выхода из канала ствола и абсолютная скорость строительного элемента в этот же момент времени.

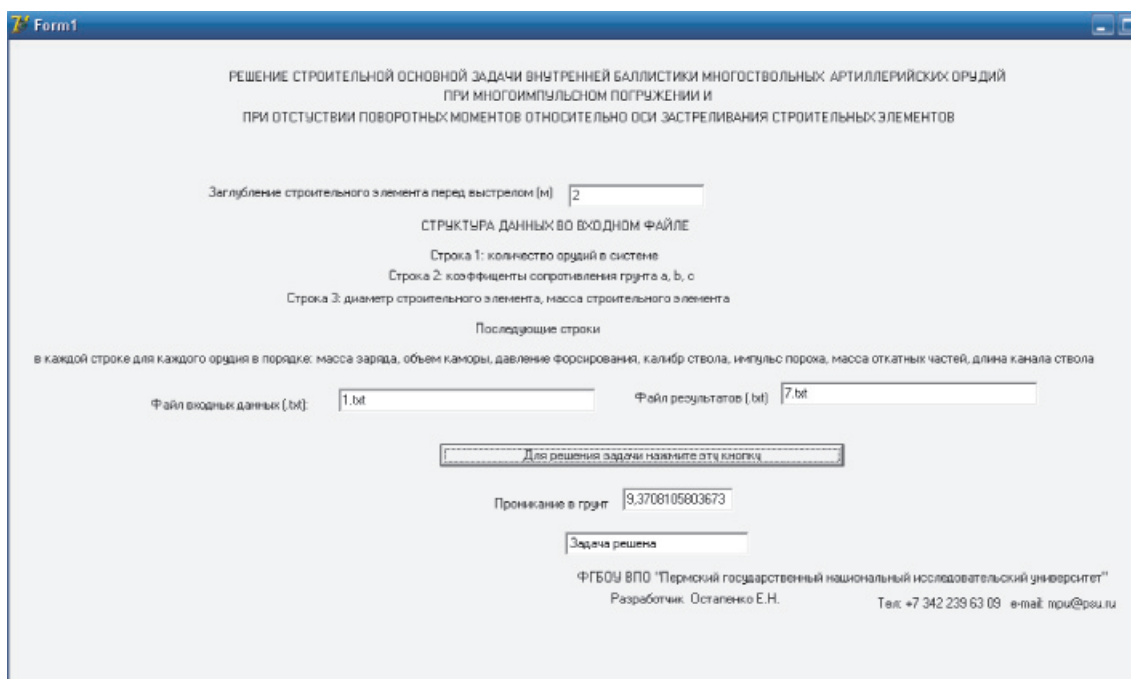


Рис. 4. Главная форма программы многоимпульсного погружения после выполнения расчетов

Программа решения основной задачи внутренней баллистики откатных многоствольных строительных артиллерийских систем для многоимпульсного погружения [2] имеет ту же архитектуру и назначение, что и программа расчета единичного выстрела. Главная форма программы расчета многоимпульсного погружения отличается лишь тем, что через главную форму вводится величина проникания строительного элемента перед выполнением очередного выстрела (рис. 4).

Структура входного файла данных аналогична приведенной структуре на рис. 3, а. В результате работы программы на главную форму программы выводится суммарная величина проникания, являющаяся результатом нескольких выстрелов (рис. 4), а основные результаты решения основной задачи внутренней баллистики выводятся в файл \*.txt, имя которого задается на главной форме программы перед выполнением расчетов, подобно приведенному на рис. 3, б.

#### Технические характеристики комплекса программ и причины его разработки

Комплекс программ написан на языке Delphi 7, функционирует под управлением ОС не ниже Windows XP. Максимальный объем загрузочных модулей 376 Кб.

При использовании процессора Pentium IV максимальное время выполнения программ комплекса, использующих термодинамическую модель выстрела и метод Рунге – Кутты 2-го порядка для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, составляющих используемые в комплексе математические модели, с шагом интегрирования  $10^{-6}$  с [3, 6], не превышает 8 с.

В настоящее время существует большое количество популярных и хорошо рекомендовавших себя среди пользователей

математические решения систем уравнений, описывающие термодинамические модели [6] импульсного вдавливания, приведенные в работах [2, 4], получить не удалось.

Применение «напрямую» функций численного интегрирования дифференциальных уравнений и систем в этих пакетах также вызывает затруднение в связи с особенностями постановки основной задачи внутренней баллистики откатных многоствольных орудий, так как для численного интегрирования уравнений средствами пакетов требуется задавать границы интервалов изменения независимой переменной или применять дополнительные методы программирования в пакетах. Правая же граница изменения времени или перемещения строительного элемента в грунте в моделях импульсного вдавливания и проникания неизвестна и вычисляется в ходе численного решения соответствующих дифференциальных уравнений. Поэтому для решения основной задачи внутренней баллистики необходимо программирование или на языках пакетов, или на других языках программирования.

Данные, приведенные в таблице, характеризуют объемы памяти, необходимые для размещения рассматриваемых пакетов на жестком диске по сравнению с наибольшим объемом программ предлагаемого комплекса. Анализ этой таблицы позволяет сделать вывод о том, что применение описываемого комплекса программ возможно в полевых условиях при выборе, например, необходимых масс зарядов, обеспечивающих заданное проникание строительных элементов в грунт, на персональных компьютерах с небольшим объемом памяти, тогда как использование рассмотренных математических пакетов для решения задач импульсного вдавливания не дает необходимого эффекта.

Объемы загрузочных модулей комплекса программ и математических пакетов

Параметр	Наименование программного продукта		
	MathCad	Maple	Разработанный комплекс программ
Объем, Мб	63,69	381	0,36

математических пакетов, позволяющих решать разнообразные математические задачи. К ним относятся, например, пакеты MathCad и Maple. В некоторых частных случаях они позволяют получать аналитические решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Как показали «эксперименты» в работе по использованию для этих целей функций odesolve, dsolve и pdsolve пакетов MathCad и Maple, анали-

Для проведения натурных экспериментов по практическому использованию комплекса программ использовались откатные одноствольные орудия (рис. 5) с техническими параметрами, приведенными в работе [3].

Верификация математической модели и комплекса программ этими экспериментами показала, что средняя относительная погрешность между экспериментальными и расчетными заглоблениями строительных



элементов в глинистый грунт с консистенцией 0,3 составила 3,1% при дисперсии 8,0%, а средняя относительная погрешность между экспериментальными и расчетными максимальными давлениями в канале ствола во время выстрела составила 2,6% при дисперсии 5,4%. Полученные результаты свидетельствуют об адекватной работе программы, а значит, о возможности ее использования при прогнозировании величины проникания строительных элементов в грунт в полевых условиях.



Рис. 5. Экспериментальное орудие, рассчитанное с помощью комплекса программ

### Заключение

Таким образом, разработанный комплекс программ обладает «дружелюбным» интерфейсом и может быть использован неподготовленным пользователем для решения основной задачи внутренней баллистики, например, при выборе в полевых условиях необходимых параметров заряжания многоствольных артиллерийских систем для решения задач, связанных с застрели-

ванием строительных элементов в грунт. Малое время выполнения программ комплекса и малый объем его загрузочных модулей позволяет эффективно использовать комплекс при решении практических задач на компьютерах, не обладающих большими вычислительными мощностями и объемами памяти.

Кроме решения технических расчетных задач, комплекс программ также используется при чтении курса «Математическое моделирование импульсно-тепловых машин» на механико-математическом факультете федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (научно-исследовательская работа № 2096 в рамках базовой части государственного задания № 2014/153 в сфере научной деятельности).*

### Список литературы

1. Маланин В.В., Остапенко Е.Н., Пенский О.Г. Необходимое условие вертикального застреливания строительных элементов в грунт из многоствольной артиллерийской системы // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – URL: [www.science-education.ru/115-12221](http://www.science-education.ru/115-12221).
2. Маланин В.В., Остапенко Е.Н., Пенский О.Г. Математические модели многоимпульсного погружения строительных элементов в грунт из артиллерийских орудий // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: материалы X Международного симпозиума, посвященного 70-летию Победы (Миасс, Россия, 8–10 сентября 2015 г.). – М.: РАН, 2015. – Т.1. – С. 75–83.
3. Маланин В.В., Пенский О.Г. Сопряженные модели динамики импульсно-тепловых машин и проникания недеформируемых тел в сплошную среду: монография / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2007. – 199 с.
4. Остапенко Е.Н. Математическая модель многоствольной строительной артиллерийской системы // Проблемы механики и управления: Нелинейные динамические системы. – 2014. – Вып. 46. – С. 107–115.
5. Патент РФ № 2348757, опубл. 10.03.2009. – Бюл. № 7.
6. Русяк И.Г., Ушаков В.М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 259 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2003611603, 04.07.2003.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615753, 22.04.2014.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614924, 29.04.2015.
10. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 10153 от 11.03.2008, № гос. рег. 502008005.