ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО (НИИМ Нижегородского университета)

На правах рукописи

But

БАЛАНДИН ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ С ПЕСЧАНЫМИ ПРЕГРАДАМИ ПРИ СКОРОСТЯХ УДАРА ОТ 50 ДО 400 м/с

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Брагов Анатолий Михайлович

Нижний Новгород - 2018

оглавление

Введение
Глава 1. Экспериментальные методы исследования ударного взаимодействия
твердых тел с грунтовыми средами15
1.1. Прямые методы регистрации параметров проникания тел в грунтовые
среды16
1.2. Методы регистрации параметров проникания тел в грунтовые среды в
обращенных экспериментах27
1.3. Некоторые экспериментальные результаты исследований проникания
ударников в грунтовые среды
Выводы по главе 1:
Глава 2. Экспериментальный комплекс для исследования процессов
соударения твердых тел с грунтовыми средами 47
2.1. Методика измерения интегральных нагрузок в прямом эксперименте 48
2.1.1.Установка для изучения проникания в грунтовые среды в прямой
постановке с использованием высокоскоростной фоторегистрации 48
2.1.2. Определение интегральных нагрузок, действующих на ударник на
квазистационарном участке внедрения 54
2.2. Измерение интегральных нагрузок в обращенном эксперименте 58
2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня
2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня
 2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня
 2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня
 2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня
 2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня
 2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня

3.1.1. Условия проведения экспериментов
3.1.2. Результаты численного анализа экспериментальной методики 70
3.1.3. Результаты прямых экспериментов
3.1.4 Анализ погрешностей определения коэффициента сопротивления 78
3.1.5. Эксперименты с использованием акселерометрии
3.2. Исследование проникания конических и полусферических оголовков в
песчаный грунт различной влажности в обращенной постановке
3.3 Проникание цилиндрического ударника с плоским торцем в песчаный
грунт различной влажности97
3.4.Экспериментальное исследование удара и проникания конических
ударников в мерзлый песок в обращенной постановке 110
3.4.1 Условия проведения экспериментов с мерзлым грунтом 111
3.4.2. Результаты экспериментального исследования проникания
конических ударников в мерзлый песок114
3.4. 3. Результаты численного моделирования ударного взаимодействия
конических ударников с мерзлым грунтом125
Выводы к главе 3133
Заключение
Список литературы 138

Введение

Актуальность темы исследования

Исследование ударного взаимодействия твёрдых деформируемых тел и конструкций с грунтами является актуальной проблемой динамики грунтовых сред, имеющей важное научное и прикладное значение. Для решения этой проблемы широко применяются аналитические и численные методы. Следует отметить, что аналитические методы позволяют выявлять закономерности процесса проникания твердых и деформируемых тел в грунтовые среды в широком диапазоне скоростей проникания в зависимости от свойств среды. В связи со сложностью и разнообразием механических свойств грунтовых сред эти методы являются приближенными, однако они в аналитическом виде получать основные выражения для позволяют параметров проникания: силы сопротивления внедрению, скорости проникания и глубины проникания в зависимости от формы проникающего тела и параметров среды.

При использовании численных и аналитических методов для решения задач проникания требуются адекватные математические модели поведения грунтов, которые основываются на знании основных физико-механических свойств грунтовых сред: динамических диаграмм деформирования, кривых ударной сжимаемости, прочностных зависимостей, закономерностей, связывающих силы сопротивления внедрению со скоростью удара, формой головной части ударника и т.д. Поэтому большую роль в изучении динамического поведения грунтовых сред играют экспериментальные исследования. Ввиду большого многообразия мягких грунтов (пески, суглинки, глины и т.д.), и ввиду различия их физико-механических свойств: плотности, влажности, гранулометрического состава и температуры, их свойства изучены ещё недостаточно. Эти обстоятельства затрудняют разработку адекватных математических моделей поведения грунтовых сред в широком температурно-скоростном диапазоне и сдерживают использование этих моделей в численных и аналитических методах анализа ударного взаимодействия твердых деформируемых тел и конструкций с мягкими грунтами. Особое место в динамике грунтовых сред занимают исследования, связанные с изучением закономерностей контактного взаимодействия жестких и деформируемых ударников с мерзлыми грунтами. Следует отметить, что несмотря на актуальность и практическую значимость, поведение мерзлых грунтов при интенсивных динамических воздействиях изучено довольно слабо.

В связи с этим, для решения задач проникания твёрдых тел в грунтовые среды требуется проведение широкого круга экспериментальных исследований физико-механических свойств и закономерностей процессов проникания, результаты которых необходимы для идентификации и верификации математических моделей динамического поведения грунтов.

Степень разработанности темы

Исследование проблем ударного взаимодействия деформируемых твёрдых тел с грунтовыми средами имеет важное научное и прикладное значение. Для решения задач проникания применяются экспериментальные, аналитические и численные методы, последние из которых базируются на известных моделях грунтов, основанных на экспериментальных данных.

Следует отметить, что аналитические методы позволяют выявлять закономерности процесса проникания твердых и деформируемых тел в грунтовые среды в широком диапазоне скоростей проникания в зависимости от свойств среды. В связи со сложностью и разнообразием механических свойств грунтовых сред эти методы являются приближенными , однако они позволяют в аналитическом виде получать основные выражения для параметров проникания: силы сопротивления внедрению, скорости проникания и глубины проникания в зависимости от формы проникающего тела и параметров среды. Большой вклад в развитие аналитических методов и решение конкретных задач проникания внесли такие зарубежные ученые, как М. Бэкман [82], У. Голдсмит [82], М. Форрестол [107,108,109,110], Дж. Бен-Дор [84,85], А. Дубинский [84,85], Д. Янкелевский [104] и др. В нашей стране аналитические методы исследования интенсивно развивались в институте проблем механики Академии наук в работах А.Ю. Ишлинского [53], Н.В. Зволинского[48,53], И.В. Симонова [72,73], Н.В. Баничука [16,17] и др. и в институте механики МГУ в работах Х.А. Рахматулина [74], А.Я. Сагомоняна [70,74], С.С. Григоряна [41,42,43,44], Н.А. Остапенко [68,69], Г.Е. Якуниной [68] и др.

В связи с бурным развитием вычислительной техники все шире используются различные методы численного решения дифференциальных уравнений, описывающих грунтовые среды. В настоящее время созданы мощные программные комплексы, предназначенные для решения нестационарных задач механики деформированного твердого тела на основе конечно-разностного или конечно-элементного подходов. Среди них можно отметить отечественные пакеты прикладных программ, разработанные в Лобачевского («Динамика-1», НИИМ ННГУ ИМ. Н.И. «Динамика-2», «Динамика-3», УПАКС, MEDGOD, UPSGOD), Институте проблем механики РАН («Астра»), Институте математического моделирования РАН (GIMM), РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина («Вулкан»), РФЯЦ-ВНИИЭФ зарубежные -Abaqus, ANSYS, LS-Dyna. («Медуза», СИГМА), а также Однако, следует отметить, что результаты теоретических исследований, как полученные аналитическими методами, так и численно нуждаются в экспериментальной верификации. Поэтому несомненна важность экспериментальных методов исследования ударного взаимодействия твердых тел с грунтами.

Использование численных и аналитических методов для решения задач проникания требует хорошего знания механических свойств грунтовых сред: прочностных свойств, а также динамических диаграмм деформирования,

ударной сжимаемости, закономерностей связывающих силы кривых сопротивления внедрению со скоростью удара, формой головной части ударника и т.д. Ввиду большого многообразия грунтов (пески, суглинки, глины и т.д.), различной их плотности, влажности, гранулометрического состава и температуры (при отрицательных температурах грунты, содержащие воду, замерзают) их свойства изучены ещё недостаточно полно, что затрудняет разработку и использование численных и аналитических методов при анализе ударного взаимодействия твердых деформируемых тел и конструкций с мягкими грунтами. В связи с этим для решения задач проникания твёрдых тел в грунтовые среды требуется проведение широкого круга экспериментальных исследований физико-механических свойств и проникания, результаты которых необходимы процессов также ДЛЯ идентификации и верификации приближённых аналитических и расчётных моделей поведения грунтовых сред.

Подобные исследования ведутся во всем мире с пятидесятых годов двадцатого столетия, начиная с пионерской работы У. Аллена [2]. Заметный вклад в развитие экспериментальных методов исследования ударного взаимодействия твердых и деформируемых тел с грунтовыми средами, а также в изучение закономерностей процессов проникания внесли У. Аллен [2,81], М. Форрестол [105,107,108,110], Г. Ховер [117], Д. Мэйнард [126], Дж. Борг [90,91,93], С. Блесс [86,87,88,89], В.А. Лагунов [67], В.А. Степанов [67], Ю.К. Бивин [21,22,23,25,26,27,28], Ю.Н. Бухарев [34,35,36], В.А. Велданов [37,38], В.А. Бердников [18], М.В. Каминский [18,54,55], А.М. Брагов [7,10,11,28,63], В.В. Баландин [8] и др. ученые.

При изучении проникания твёрдых деформируемых тел в грунты наиболее важными являются две задачи: определение конечной глубины проникания тела определённой формы в конкретный грунт и измерение сил, действующих на проникающее тело как на начальном, нестационарном участке внедрения, так и на квазистационарном с учетом формы ударника, скоростей удара, гранулометрического состава и состояния грунта.

Известно, что численное решение задачи глубокого проникания и определения конечной глубины внедрения затруднено из-за накопления неконтролируемой погрешности при расчёте. Часто для определения конечной глубины внедрения используют приближённые решения с использованием результатов определения интегральных сил сопротивления, действующих на квазистационарной стадии внедрения. Уравнения движения проникающего тела записывается в виде двух- и трёхчленных выражений, содержащих компоненты, отвечающие за гидродинамический напор, пропорциональный квадрату скорости проникания, за поверхностное трение, пропорциональное скорости, и параметр характеризующий прочность среды.

Силы, действующие на квазистационарном участке внедрения, экспериментально чаще всего определяются в прямой постановке – т.е. ударник внедряется с известной начальной скоростью в неподвижную мишень. Это позволяет проводить при некоторых предположениях вычисление сил сопротивления на квазистационарном участке внедрения достаточно длительное время.

Значения сил сопротивления на начальном участке проникания в грунтовую среду, т.н. перегрузки, важно знать для расчета напряженно деформируемого состояния и прочности проникающих конструкций. Экспериментально эти величины определить в прямой постановке с достаточной точностью не удается. Для непосредственного определения силовых характеристик проникания на начальном, нестационарном участке обращенные чаще всего используются баллистического методы эксперимента. В данной постановке достаточно легко обеспечить съём информации с датчиков, расположенных на неподвижной модели.

Анализ опубликованных экспериментальных результатов показывает, что несмотря на длительный период исследования ударного взаимодействия деформируемых твердых тел с грунтовыми средами, многие важные и интересные области исследованы фрагментарно, а экспериментальные

результаты процессов проникания в мёрзлые грунты практически отсутствуют.

Исследование закономерностей ударного взаимодействия жестких и деформируемых ударников с мерзлыми грунтами имеет некоторые особенности. В мерзлом состоянии грунты обладают значительной прочностью и по своим свойствам похожи на горные породы. При ударном нагружении замёрзшие грунты могут разрушаться подобно горным породам. К тому же при достаточно больших давлениях лёд, содержащийся в грунте претерпевает фазовый переход и превращается в воду. В этой связи особая роль отводится лабораторным экспериментальным исследованиям закономерностей деформирования и разрушения мерзлого грунта и льда при параметров, характеризующих свойства варьировании грунта, И температуры. Следует отметить, что в известной литературе сведения о закономерностях проникания твердых тел в мерзлые грунты описаны недостаточно.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является развитие экспериментальных методик и изучение на их основе закономерностей проникания осесимметричных твердых и деформируемых тел в грунтовые среды в различном состоянии: сухие, влажные и мерзлые.

Для достижения поставленной цели были определены следующие основные задачи:

1.Проведение модификаций существующих установок на базе газовых пушек калибрами 20 и 57 мм для повышения точности измеряемых параметров в диапазоне скоростей удара до 400 м/с.

2. Развитие методик прямого и обращенного эксперимента для определения силовых характеристик, действующих на осесимметричные тела различной формы при их проникании в грунтовые среды. С помощью

численных расчетов определение границ применимости используемых методик.

3. Проведение экспериментальных исследований проникания сухой, осесимметричных тел В влажный И замороженный песок естественного Получение систематических состава. данных, характеризующих основные зависимости проникания цилиндрических ударников с различными головными частями в песок в различных его состояниях в диапазоне скоростей удара до 400 м/с.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Модифицирован комплекс экспериментальных методик для исследования процессов ударного взаимодействия твердых деформируемых тел и элементов конструкций с мягкими грунтами в различных состояниях.

2. Проведен численный анализ модифицированной методики прямого и обращенного эксперимента, определены границы областей применимости.

3. Получены новые зависимости, связывающие интегральные нагрузки с формой ударяющего тела, скоростью удара, влажностью песка и температурой испытаний

<u>Теоретическая значимость</u>

В работе получены новые экспериментальные результаты по прониканию цилиндрических ударников в песок различной влажности. Определены интегральные нагрузки, действующие на проникающее тело на различных участках внедрения. Определены силы сопротивления, действующие на конусы при проникании в мерзлый песок различной влажности в зависимости от скорости удара.

Практическая значимость

Разработанные и модифицированные комплексы методических и аппаратных средств регистрации опытных данных и экспериментальные

результаты могут быть использованы при проектировании новой техники в ряде научно-исследовательских организаций: РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ и др.

Полученные результаты могут быть использованы для верификации математических моделей грунтовых сред и численных расчетов ударного взаимодействия твердых тел с грунтовыми средами.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе использованы методики экспериментального исследования процессов проникания твердых деформируемых тел в грунтовые преграды в прямой и обращенной постановке, разработанные в НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, а также методики численного исследования процессов проникания твердых деформируемых тел в грунтовые преграды UPSGOD и MEDGOD, разработанные в НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Основные положения, представляемые к защите:

1. Модернизация комплекса методических и технических средств для экспериментального изучения процессов ударного взаимодействия твердых деформируемых тел с мягкими грунтами в прямой и обращенной постановках при скоростях удара до 400 м/с.

2. Экспериментальное и численное обоснование методик прямого и обращенного экспериментов, позволяющих определять зависимости глубины проникания твердых тел в грунтовые среды от времени и методики определения интегральных нагрузок (силы сопротивления внедрению), действующих как на квазистационарном, так и на нестационарном участке проникания.

3. Новые экспериментальные закономерности процесса проникания в сухой, влажный и мерзлый песок ударников с различной формой головной части: полусфера, конус, цилиндр в диапазоне скоростей до 400 м/с в обращенной постановке.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается тщательным выбором и анализом современных методов и средств экспериментальных исследований, совпадением ряда полученных в работе результатов с данными зарубежных и отечественных авторов.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на:

-Х Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011 г.)

- XI Международная конференция Забабахинские научные чтения: (Снежинск, 2012)

-XVIII Международный симпозиум "Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред" (Москва, 2012)

-Всероссийская конференция "Взрыв в физическом эксперименте"

(Новосибирск, 2013 г.)

-Форум молодых ученых (Нижний Новгород, 2013)

- XXI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (Москва, 2015.)

-XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015 г.)

<u>Публикации</u>

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 12 из них в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России [9,12,13,14,30,31,59,60,62,63,64,66].

Личный вклад автора

- Модификация экспериментальных комплексов для проведения динамических испытаний по ударному взаимодействию твердых тел с различными преградами [9,12];
- Разработка программ обработки экспериментальных данных в программной среде LabView;
- Проведение экспериментальных исследований по прониканию твердых деформируемых тел в сухой песок в прямой постановке [9,62,];
- Проведение экспериментальных исследований по прониканию твердых тел в грунтовые среды при различной температуре и влажности в обращенной постановке [9,13,14,30, 59, 60,63, 64, 66];

В совместных работах Брагову А.М. принадлежит постановка задачи, общее руководство исследованиями и участие в анализе результатов; Баландину В.В., Константинову А.Ю., Ломунову А.К. помощь в проведении экспериментальных исследований и обработке результатов экспериментов; Котову В.Л., Крылову С.В., Линник Е.Ю. помощь в проведении численных расчетов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит <u>152</u> листа машинописного текста, <u>45</u> рисунков, <u>12</u> таблиц; список литературы включает <u>144</u> наименований.

Диссертационная работа выполнена при поддержке :

- 1.Научные и научно -педагогические кадры инновационной России 2009 2013 годы 2012 1.3.2 12 000 -1004
- Гранты РФФИ: № 12-05-01075-а, 12-08-01227-а,13-08-00531, 13-08-00862, 15-08-05517, 15-08-07977, 16 - 01-00524, 16-08-00825, 17-38-50140
- Третья глава выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

в рамках соглашения № 14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246)

<u>Благодарности</u>

Автор выражает благодарность сотрудникам НИИМ ННГУ Брагову А.М., Баландину В.В., Константинову А.Ю., Ломунову А.К., Филипову А.Р., Ламзину Д.А. за консультации и помощь в проведении экспериментов, Котову В.Л., Крылову С.В. за консультации и помощь в проведении численных расчетов.

Глава 1.Экспериментальные методы исследования ударного взаимодействия твердых тел с грунтовыми средами

Существуют две группы экспериментальных методов изучения проникания твердых тел в преграды из грунта: прямые и обращенные. В прямых методах разогнанный до необходимой скорости ударник соударяется неподвижной мишенью [2,3,8-10,12,15,18-28,34с 37,50,52,54,55,65,67,81,82,86-91,93,93,101-103,105,131,136,138,139]. В разогнанная грунтовая мишень ударяется о обращенных экспериментах неподвижную головную часть исследуемой формы [7,8,40,107,108,110,112,117,126]. Каждая группа экспериментальных методов обладает определенными достоинствами И недостатками. В прямых экспериментах затруднен съем информации непосредственно с ударника в процессе внедрения в мишень, однако не требуется метать большие массы, поэтому легче достигаются большие скорости удара. В обращенных методах легко получить информацию о силовых характеристиках достаточно взаимодействия ударника и разогнанной преграды, однако возникает необходимость метать гораздо большие массы чем в прямых экспериментах.

Для разгона соударяющихся тел до требуемых скоростей в диапазоне скоростей удара до 1000 м/с наиболее широко используются легкогазовые и пороховые пушки. В газовых пушках [7,8,18-28,40,61-65,] используется энергия сжатого газа (чаще всего воздуха и гелия). Выбор газовых пушек в качестве разгонных устройств обусловлен тем, что они обеспечивают хорошую повторяемость скоростей метаемых тел и могут достаточно легко использоваться в лабораторных условиях. Калибр ствола газовых пушек может превышать 100 мм. В диапазоне скоростей до 1000 м/с используются одноступенчатые газовые пушки, при больших скоростях метания - более сложные по конструкции двух и трехступенчатые устройства.

В пороховых пушках разгон осуществляется за счет энергии сгорания пороха [2,11,12]. Данные устройства позволяют получать скорости метания до 2 км/сек для снарядов массой до 10 кг. Однако эти разгонные устройства

имеют ряд недостатков: во-первых большой разброс скоростей от опыта к опыту, во-вторых применение пороха требует соблюдения особых мер безопасности, что ограничивает использование пороховых пушек в лабораторных условиях.

1.1. Прямые методы регистрации параметров проникания тел в грунтовые среды

При проведении экспериментальных исследований проникания твердых тел в прямых экспериментах чаще всего проводят измерения таких параметров процесса, как зависимость глубины проникания ударника от времени, конечной глубины внедрения, скорости проникания и ускорения (замедления) проникающего тела. Для этого используются различные датчики, размещенные в мишени, высокоскоростная киносъемка процесса проникания, многокадровая рентгеноимпульсная съемка, интеферометрические методы измерения скорости внедрения И акселерометрия.

Для измерения перемещения во времени тела, проникающего в сухой песок, У. Аллен и др. [2,81] впервые использовали метод рам-мишеней, хорошо известный из экспериментальной аэродинамики. В качестве мишени использовался сухой песок с размером зерна около 1 мм. Внутри контейнера находились рамы-мишени с натянутыми медными проволочками на расстоянии 10см друг от друга. Ударник представлял собой цилиндр с оголовком в виде конуса диаметром 12,7 мм. Выстрелы проводились из гладкоствольного порохового разгонного устройства вдоль оси контейнера поперечным сечением 30,5х30,5 см и длиной 3,66м. На одной из его сторон было 76 мм входное отверстие с целлофановой пленкой толщиной 0,005 мм. При движении в грунтовой среде ударник поочередно разрывал проволочки на рамах и регистрирующая аппаратура фиксировала моменты времени прохождения ударником соответствующего сечения. В результате была получена зависимость глубины внедрения от времени.

Аналогичный метод применил исследовании при наклонного проникания Д. Мэйнард [126]. В эксперименте около десяти сеток устанавливалось вдоль траектории движения снаряда. При движении В грунте снаряд последовательно разрывал электрические цепи сеток, формируя отметки времени. Применение сеток позволило производить замеры начальной скорости удара, скорости движения снаряда внутри мишени, остаточной скорости.

Близкий метод использовали К. Ватанабе и др. [140]. Эксперименты проводились на установке состоящей из пороховой пушки калибра 15мм. Ударник, представляющий пластину диаметром 15мм и толщиной 5мм, был закреплен на поликарбонатовом поддоне с общей массой 12 и 12,5г. Выстрел производился вертикально в контейнеры различного размера, заполненные сухим песком. Перемещение ударника в контейнере фиксировалось при разрывании ударником оптических волокон толщиной 0,2мм. Волокна располагались в контейнере с песком поперек направления движения ударника с интервалом 20мм. Через волокна пропускался свет OT светодиодов, прохождение которого фиксировалось фотоприемниками. По полученным данным строилась зависимость перемещения ударника от времени.

В работе В.А. Бердникова и др. [18] для определения перемещения ударника внутри песчаной мишени использовались фольговые контактные датчики, замыкающиеся при прохождении через них острия ударника.

В работе [86] для определения местоположения ударников в процессе проникания С. Блесс и др. использовали специальные проводящие экраны на бумажной основе, расположенные в контейнере с сухим песком через каждые 150 мм.

Следует отметить, что подобные методы достаточно трудоемки. К тому же при использовании разрывающихся проволок и световодов чувствительные элементы (проволочки и световоды) могут оказывать влияние на движение ударника и, в то же время, сами могут испытывать

смещение за счет движения песка. Также существует неопределенность в моментах времени разрыва чувствительных элементов: замыкание может производиться острием ударника или какой-то частью его конической поверхности. Для получения скоростных И силовых характеристик взаимодействия ударников с преградой также необходимо одно- или двукратное дифференцирование данных, что может существенно снижать точность определения интегральных нагрузок. К тому же, эти методы не позволяют достаточно точно определить максимальные нагрузки, возникающие на нестационарном этапе взаимодействия снаряда и преграды.

Для определения зависимостей "глубина внедрения - время" при проникании ударников в преграды из грунта широко используется высокоскоростная киносъемка [3,8,10,18,19,20,45,49,67,71,76,138].

В работе В.А. Лагунова и В.А. Степанова [67] при изучении ударного взаимодействия цилиндрического ударника с сухим песком наряду с рентгеноимпульсной съемкой применялась высокоскоростная киносъемка с использованием камеры типа Кранца-Шардина.

Камера типа Кранца-Шардина состоит из нескольких фотокамер, для каждой из которых используется свой точечный источник света (искровой разрядник [76] или импульсная лампа [49]). Количество регистрируемых кадров соответствует количеству отдельных фотокамер и источников света. Время между кадрами может регулируется в широких пределах с помощью соответствующей синхронизирующей аппаратуры. При большом количестве фотокамер возникают сложности с размещением источников света и поэтому объективов, камеры, реализующие схему Кранца-Шардина, становятся громоздкими и достаточно дорогими. К тому же всем этим изображения, связанный камерам присущ параллакс с взаимным расположением источников света и объективов в пространстве. С увеличением числа кадров также усложняются и электронные схемы управления последовательностью вспышек источников света.

Широкое применение экспериментальных исследованиях В быстропротекающих процессов ранее находили камеры оптико-С механической коммутацией изображения [3,10,19,20,45,71,138]. Оптическая система таких камер [45] состоит из общего входного объектива, вращающегося плоского зеркала (или зеркального многогранника) и большого количества вторичных объективов, расположенных по дуге окружности (объективные вставки). В фокальной этих плоскости объективов располагается фотопленка, каждый вторичный объектив строит изображение отдельного кадра, фиксирующего отдельную фазу процесса. Благодаря общему входному зрачку для всех кадров подобные камеры свободны от параллакса. Для обеспечения ждущего режима в этих камерах В используют скрещенные зеркала. качестве источников света С кинокамерами подобного типа чаще всего используются импульсные лампы, позволяющие получать длительность световой вспышки ~1000 мкс и более. регистрации процесса определяется Длительность длительностью его освещения.

Несмотря на большое количество регистрируемых кадров и отсутствие параллакса оптико-механической коммутацией камеры С имеют нерезкости существенный недостаток виде достаточно большой В изображения, связанной с движением объекта съемки во время экспозиции, так как время экспозиции отдельных кадров достаточно велико и составляет примерно половину интервала между кадрами.

В.В. Баландин [8] использовал камеру ВСК-5 с оптико-механической коммутацией при изучении ударного взаимодействия цилиндрических ударников с различными оголовками (полусфера, конусы, сфероконус) с мишенью из сухого песка. Определялись зависимости глубины внедрения от времени до момента полного погружения ударников в материал преграды.

В последнее десятилетие широкое распространение в научных исследованиях получили высокоскоростные цифровые кинокамеры [90,91,96,137,138,140]. Данные устройства обладают рядом неоспоримых

преимуществ по сравнению с камерами типа Кранца - Шардина и камерами с зеркальной разверткой: в них отсутствует параллакс между отдельными кадрами, интервалы между кадрами и времена экспозиции регулируются независимо и устанавливаются в широких пределах вплоть до нескольких наносекунд, за счет чего достигается высокая точность регистрации положения объекта, имеется непосредственная связь с компьютером, что существенно упрощает и ускоряет процедуру обработки экспериментальной информации.

С использованием цифровой камеры Photron RS CMOS Дж. Борг и Т Воглер [90,91,137] провели серию экспериментов по внедрению ударников различной формы в сухой песок. Для регистрации скорости движения частиц использовалась высокоскоростная фотосьемка и технология PIV (particle image velocimetry). Данная технология по последовательным кадрам процесса позволяет определять перемещения частиц-маркеров и по ним построить поля скоростей частиц песка при движении ударника. Выстрел проводился вдоль прозрачной стенки контейнера так, чтобы ударник попадал в объектив камеры.

В работе К. Ватанабе [139] с помощью высокоскоростной многокадровой цифровой камеры фиксировались начальная стадия проникания (до погружения ударника в мишень) и формирование выброса.

В работе В.А. Бердникова и др [18] высокоскоростная съемка использовалась для определения скоростей входа в мишень из влажного песка и выхода из нее ударников.

В статье М. Бучели и др. [96] с помощью высокоскоростной цифровой камеры регистрировался процесс проникания цилиндрического ударника с полусферической головной частью в глинистую среду. Строились зависимости глубины проникания от времени.

При съемке процесса проникания в видимом свете существует ограничение: регистрация движения ударника может вестись только до его полного погружения в мишень. От этого недостатка свободна в рентгеноимпульсная фотосъемка процесса соударения [15,18,47,50,54,67,75,93,99,101,115,123,128,132,142]. В результате были получены серии последовательных рентгеновских фотографий через заданные интервалы времени, что позволило определить зависимость перемещения тела внутри непрозрачной преграды от времени.

Рентгеноимпульсные исследования быстропротекающих процессов производят с помощью нескольких источников излучения, последовательно срабатывающих и строящих изображение изучаемого объекта на отдельных фотокассетах (так же как в фотокамерах типа Кранца-Шардина). Источники излучения и фотокассеты размещены так, чтобы максимально уменьшить перекрестное экспонирование фотоматериала соседними трубками. Чаще всего в состав установки для импульсного рентгенографирования входят от 3 до 5 рентгеновских трубок. Однако известны случаи применения и большего количества рентгеновских источников [123,142]. Для повышения чувствительности рентгеновской пленки обычно пользуются усиливающими экранами.

Источниками импульсного рентгеновского излучения служат рентгеновские трубки, представляющие собой высоковольтный вакуумный (давление в баллоне ниже 10⁻⁴ мм рт.ст.) диод. При пропускании импульсов тока, достигающих нескольких тысяч ампер, при напряжении от нескольких нескольких десятков киловольт ДО миллионов вольт, импульсные рентгеновские трубки генерируют импульсы рентгеновского излучения малой длительности и большой интенсивности. Формируемое при этом рентгеновское излучение просвечивает мишень с ударником и формирует теневое изображение процесса соударения на фотопленке. Для получение рентгеновских импульсов требуется достаточно сложное электронное оборудование [75,77].

Так как длительность импульсов излучения для рентгеновских трубок составляет менее 10⁻⁶ с, то нерезкость изображения, вызванная перемещением объекта съемки за время экспозиции кадра невелика. Однако

из-за конечных размеров источников рентгеновских лучей (обычно1-5 мм), системам импульсного рентгенографирования присущ недостаток, выражающийся в появлении геометрической нерезкости изображения [75].

$$U=f\frac{b}{a-b}$$

где U - нерезкость (ширина полутени), f - эффективный диаметр фокуса, a - расстояние между фокусом (источником рентгеновских лучей) и пленкой, b - расстояние между объектом и пленкой.

Для уменьшения геометрической нерезкости можно увеличивать расстояние от трубки до пленки, что приводит к снижению дозы излучения и уменьшению толщины просвечиваемого материала. Для снижения размытости изображения можно также уменьшать расстояние от объекта съёмки до пленки, но это не всегда возможно из-за опасности повреждения кассеты с пленкой и усиливающими экранами осколками ударника или мишени.

Дж. Коллинз, Р. Сераковский и др. [101,123,128] использовали от 4 до 7 трубок импульсных рентгеновских для определения положения цилиндрических ударников, проникающих в мишень из песка (сухого или водонасыщенного). Мишень представляла собой ящик В виде параллелепипеда. Проникание осуществлялось вдоль длинной стороны ящика. Трубки размещались вдоль траектории движения ударника и срабатывали по сигналу от индуктивных датчиков - колец из медной проволоки с током.

Использование рентгеноимпульсной техники для изучения процессов соударения требует также применения достаточно серьезных мер защиты персонала от действия рентгеновского излучения.

Несмотря на дороговизну и сложность её применения, импульсная рентгеновская техника широко используется при исследовании процессов проникания твердых тел в грунтовые среды [15,18,47,50,54,67,75,93,99,101,115,123,128,132,142].

В работе А. Коллинза и др.[100] описывается разработанная авторами методика цифровой спеклрадиографии. Она используется для измерения полей внутренних течений при проникании в песок ударников со скоростями порядка 200м/с. Авторы используют технику кросс-корреляции цифровых изображений, полученных с использованием рентгеносъёмки. В качестве маркеров в контейнер с песком, добавляют свинцовую крошку. При внедрении ударника происходит смещение песка вместе со свинцовой крошкой. На снимке видны частицы свинца в виде белых пятен на черном фоне. Они и образуют спекл который обрабатывается по алгоритму кросскорреляции цифрового изображения. Сравнивая информацию базового спекла с последующими, зарегистрированными в процессе внедрения, авторы получают информацию о движении песка.

Данная методика схожа по примененным программным средствам с методикой PIV, использованной в своих работах Дж. Боргом и др. [90,91]. В экспериментах использовались ударники длиной 100 мм и диаметром 10 мм с головными частями различной формы: с плоским торцем, оживалом и полусферой. Их разгон до скорости 200 м/с осуществлялся с помощью газовой пушки. Песок с размерами частиц 0,6-1,6 мм помещался в контейнер длиной 150 мм и диаметром 100 мм. Построены распределения скоростей частиц песка при проникании ударников.

В работе В.А. Бердникова и др. [18] рентгеноимпульсная съёмка использовалась для определения положения ударника в песчаной мишени и формы каверны.

Высокоскоростная съемка в видимых и рентгеновских лучах позволяет определить параметры перемещения отдельных элементов процесса взаимодействия или объектов в целом. Для получения интегральных нагрузок, действующих на проникающее в преграду тело необходимо двойное дифференцирование экспериментальных зависимостей перемещения от времени. Однако данная процедура не позволяет с достаточной точностью

определять силы и ускорения, действующие на ударники в процессе соударения.

Размещение датчиков для регистрации параметров взаимодействия проникающего тела с преградой непосредственно на ударнике, позволяет существенно упростить процедуру обработки данных и повысить точность измерений. При скоростях соударения до 100 м/с достаточно легко обеспечить регистрацию сигналов с датчиков, размещенных на ударяющем в мишень снаряде. Однако при больших скоростях удара процесс съема информации сильно усложняется. В качестве чувствительных элементов при регистрации силовых характеристик проникания чаще всего используют тензорезисторы [112,117,130] и пьезоакселерометры [34,35,36,38,65,102,102,122].

В работе [130] упругий ударник с различными оголовками (конический, полусферический, плоский) ударялся в мишень из горных пород при скоростях от 10 до 22 м/с. Для регистрации деформаций в ударнике на его боковой поверхности на противоположных сторонах было наклеено два тензорезистора. При выстреле ударник размещался в дульной части пушки, вблизи от мишени. Тензодатчики соединялись с измерительной аппаратурой и источником питания с помощью проводов, что обеспечивало надежное получение экспериментальной информации.

Похожий метод использовался в работе [112] при исследовании реакции горных пород на ударное бурение. В этих экспериментах мерный стержень с различными оголовками в виде конуса или клина внедрялся в мишень из горной породы. В качестве нагружающего устройства использовался маятниковый копер, наносящий удар по заднему торцу стержня. Для регистрации деформаций и напряжений в стержне, на него были наклеены две группы тензорезисторов: одна у заднего торца, другая в середине стержня. Сила сопротивления внедрению определялась по напряжениям в падающей и отраженной волне.

Для измерения ускорений в прямых экспериментах на ударниках размещаются пьезоакселерометры [34,35,36,38,65,102,103,122]. В работах Ю.Н. Бухарева., В.П. Гандурина и др [34,35,36] пьезоакселерометр устанавливался на основание конуса и соединялся с измерительной аппаратурой тонким кабелем, который укладывался кольцами в полой цилиндрической части ударника виток к витку и выводился наружу через отверстие в стволе газовой пушки. При разгоне ударника кабель разматывался в стволе установки и обеспечивал передачу сигнала на регистрирующую аппаратуру. Сигнал с пьезоакселерометра подавался на осциллограф через согласующее устройство - усилитель заряда.

Близкую методику использовали В.А.Велданов и др. [38] при проведении экспериментов С коническими ударниками при ИХ взаимодействии с пластилиновыми мишенями. Ударник, оснащенный акселерометром, размещался на дульном срезе ствола пороховой пушки. Разгон до скоростей до 200 м/с осуществлялся подрывом порохового заряда. Использование акселерометрии с проводной связью позволяет получать непосредственно замедление ударника во времени и силу сопротивления, действующую на ударник с достаточно высокой точностью. Однако при скоростях более 200 м/с чрезвычайно трудно сохранить в целостности проводную связь акселерометра и регистрирующей аппаратуры при разгоне и, соответственно, получить информацию с акселерометра в процессе удара. Поэтому большой интерес представляет использование методик, обеспечивающих бесконтактный информации с проникающего съём ударника.

М. Форрестол и др. [103] использовали акселерометры при проведении прямых опытов по прониканию снарядов калибра 76 мм в мишени из бетона. Каждый снаряд был оборудован акселерометром и специальной регистрирующей аппаратурой, выдерживающей ускорения при ударе о мишень. Съём информации с регистрирующей аппаратуры осуществлялся после извлечения снаряда из мишени. Разгон в пороховой пушке

осуществлялся до скоростей 160 - 340 м/с. Кроме того, процесс соударения регистрировался с использованием высокоскоростной кинокамеры.

Для исследования процессов проникания в последние годы используют интерферометрические методики, позволяющие бесконтактно получать информацию о скорости движущегося тела. С. Блесс и др. [89] использовали интерферометр PDV (Photonic Doppler Velocimeter) для записи скорости движения сферы в сухом и влажном песке различной плотности и других средах, моделирующих поведение грунтов. Были получены зависимости скорости внедрения до момента, когда выброс грунта перекрывал луч лазера, направленный на тыльную поверхность сферы.

В работе А. Ченга [98] для регистрации скорости движения заднего торца взаимодействующего С мишенью, ударника, использовался допплеровский радар. В данном устройстве, работающем на частоте 94 ГГц при длине волны около трех милиметров, реализована схема радиоинтерферометра Майкельсона С двумя ортогональными (т.е. сдвинутыми по фазе на 90 градусов) выходными каналами.

В прямых экспериментах достаточно часто используются различные датчики для определения отдельных характеристик проникания. Например, в работе М.В. Каминского и др.[55] представлены две методики регистрации процесса расширения каверны, формирующейся в грунтовой преграде при внедрении в нее ударника с использованием датчиков проводимости и электроконтактных датчиков. Для измерения напряжений в волне сжатия в работе Дж. Борга и др. [91] использовались пьезоэлектрические датчики.

В работах Дж. Колинза и Сиераковского [101] для регистрации перемещения ударников в песке наряду с рентгеноимпульсной съемкой использовались индукционные датчики в виде витков медного провода по которому пропускался ток.

1.2. Методы регистрации параметров проникания тел в грунтовые

среды в обращенных экспериментах

Как уже отмечалось выше в прямых экспериментах при скоростях соударения с мишенями более 200 м/с трудно обеспечить надежный съем информации с датчиков, размещенных на движущихся ударниках, поэтому достаточно часто при изучении проникания используют обращенный эксперимент. В обращенной постановке ударник неподвижен (по крайней мере в начальный момент времени), а удар по нему наносится мишенью, разогнанной до нужной скорости. Основной недостаток обращенных методик - ограничения по массе метаемых мишеней и их геометрическим размерам, определяемым калибром разгонного устройства.

Для измерений в обращенных экспериментах используются в основном, те же чувствительные элементы, что и в прямых: тензорезисторы, акселерометры, электроконтактные датчики. Также в обращенных баллистических экспериментах находят применение методы лазерной интерферометрии [108,110].

Для непосредственного измерения ускорения в таких экспериментах могут применяться пьезоакселерометры. Сила сопротивления в подобных экспериментах определяется произведением общей массы снаряда на измеренное ускорение.

М.Форрестол использовал пьезоакселерометры для изучения процессов взаимодействия конических и оживальных оголовков с мишенью из искусственного песчаника [107,110]. Контейнер с помещенной внутрь мишенью разгонялся пороховой или газовой пушкой до скоростей 200-1200 м/с и наносил удар по оголовку, закрепленному в специальной обойме из полиуретана. На тыльной стороне оголовка, изготовленного из вольфрамового сплава, закреплялся акселерометр с пределом измерения 10^5 g.

Данный метод очень надежен, однако требует применения согласующей аппаратуры (усилителей заряда) [76,86,89]. К тому же акселерометры разрушаются после удара, а хорошие акселерометры достаточно дороги.

Лазерные интерферометры нашли широкое применение для регистрации скорости свободной поверхности в плоско-волновых экспериментах [99,100,107]. М. Форрестол использовал этот метод для регистрации скоростей движения снарядов, подвешенных на тонких проволочках, при взаимодействии с грунтами в обращенных экспериментах [108,110].

В работе [108] был использован интерферометр смещения для определения перемещения тыльной поверхности снаряда. Перемещение определялось по количеству зарегистрированных биений интенсивности излучения на входе регистрирующего устройства. В работе [110] для измерения скорости оголовка в обращенном эксперименте был использован интерферометр VISAR. Можно отметить высокую надежность интерферометров и высокую точность получаемых результатов, однако техническая реализация данных методов достаточно сложна.

Обращенную методику с использованием тензометрии применял Г. Ховер [50,117]. Он провел экспериментальные исследования процессов проникания длинных стержней в металлические мишени. В качестве чувствительных элементов использовались фольговые тензорезисторы. были расположены в нескольких сечениях на различных Датчики расстояниях от носика стержня. Мишени представляли собой пластины из особо броневой изготавливались чистой стали, a стержни -ИЗ инструментальной стали. Г. Ховер сравнил результаты прямого И обращенного экспериментов и пришел к выводу, что в обращенной постановке полученные результаты обладают более высокой надежностью и качеством [117]. Подобная методика применялась в работе [95] при изучении взаимодействия стальной пластины с твердым стержнем.

В. Голдсмит [40] применил методику обращенного эксперимента с мерным стержнем, оснащенным пьезодатчиками, для определения

контактных сил при соударении стальных шариков со стержнем. Д. Мэйнард [126] использовал методику мерного стержня в обращенном эксперименте при исследовании начального этапа наклонного соударения снарядов с грунтовыми средами, бетоном и т.д. Для измерения использовался мерный стержень с пристыкованной носовой частью нужной формы. Вдоль оси стержня наклеивались тензодатчики на противоположных сторонах диаметра стержня. Считалось, что деформация в стержне прямо пропорциональна нагрузке до тех пор, пока волна сжатия не отразится от противоположного торца. Согласно одномерной теории упругих волн [57] сила, действующая на нагружаемый конец стержня равна:

$F = \varepsilon ES$

где *F* - сила, є - деформация, *E* - модуль Юнга материала стержня, *S* - площадь сечения стержня.

В.В. Баландин [8] применил обращенную методику с использованием мерного стержня и динамической тензометрии для определения сил сопротивления, действующих на оголовки различной формы на начальном нестационарном участке внедрения в мягкие грунты. Мерный стержень был изготовлен из высокопрочной стали 02H18K9M5T с пределом текучести более 2 ГПа.

Применение мерного стержня для измерения силы сопротивления внедрению с использованием тензорезисторов для регистрации упругих деформаций в стержне достаточно просто в реализации и не требует согласующей аппаратуры. Применимость данной методики ограничивается лишь прочностными характеристиками головной части ударника и стержня в процессе внедрения они не должны испытывать пластических деформаций.

1.3. Некоторые экспериментальные результаты исследований проникания ударников в грунтовые среды.

Основополагающие работы по исследованию проникания в грунтовые среды связаны с именами Понселе, Робинса, Эйлера и Резаля [82]. Ими были предложены различные законы проникания твердого тела в песок и глины. Однако, на тот момент отсутствовали экспериментальные данные, которые позволили бы оценить правильность предложенных теорий. Начало современного этапа исследований проникания в грунтовые среды было положено У. Алленом [1], сформулировавшим уравнение, объединяющее все ранее предложенные соотношения, выражающие законы проникания Понселе, Робинса, Эйлера и Резаля, как частные случаи выражения:



где *V* - скорость прникания снаряда в грунт; а, β, γ - постоянные.

В своей работе У. Аллен [1] определил коэффициенты α , β , γ по экспериментальным зависимостям глубина проникания - время. Опыты проводились со снарядами, имеющими форму конуса, с различными углами конусности от 10^{0} до 180^{0} , при скоростях удара в диапазоне 670-920 м/с. В качестве мишени в экспериментах использовался сухой песок с характерными размерами частиц до 1 мм.

Отметив, что предложенная им трехчленная зависимость не вполне точно отражает закономерности процесса проникания, У. Аллен предположил, что существуют два режима проникания:

$$\frac{dV}{dt} = \alpha_{t}V^{2}$$
 при $V_{0} > V > V_{k}$
$$\frac{dV}{dt} = \alpha_{t}V^{2} + \gamma$$
 при $V_{k} > V > 0$,

где V - текущая скорость проникания; V_0 - скорость удара, V_k - некоторая критическая скорость перехода, лежащая в диапазоне 90–140 м/с, α_1 , α_2 , γ - постоянные, зависящие от формы ударника. Эти уравнения соответствуют закону проникания в форме Понселе. У.Аллен высказал предположение, что

переход, имеющий место при критической скорости, связан с величиной местной скорости звука в песке.

В работе [102] приведены результаты экспериментального исследования проникания стального конуса (угол раствора конуса 2 φ =28⁰) в песчаную мишень при скоростях удара 3 – 9 м/с и 45 – 75 м/с. В экспериментах ускорение проникающего тела определялось с помощью акселерометров. Получено, что сила сопротивления выражается в виде квадратичной функции начальной скорости

где, F – сила сопротивления, V_0 – начальная скорость удара, a, b, c – коэффициенты, зависящие от свойств материала мишени, а также от формы и массы снаряда.

Для сухого песка коэффициенты данного уравнения составили: a=10000, b=260, c=1,45 для удара снарядом с плоским торцем, и a=7100, b=0,*c*=0,87 - для удара коническим снарядом. Проведенное сравнение глубине экспериментальных данных ПО проникания с данными, полученными путем интегрирования уравнения движения с использованием определенной экспериментально силой показало их расхождение. По мнению авторов эти различия связаны с непостоянством коэффициентов *a,b,c* и нестационарностью нагрузки на начальном этапе внедрения.

В обзоре [82] приведены различные эмпирические зависимости для расчета глубины проникания в зависимости от характеристик снаряда и мишени в формах Понселе, Резаля и Петри и Янга. Для некоторых типов грунтов (сухой и влажный песок, глина и т.д.) также приведены соответствующие коэффициенты этих эмпирических уравнений.

В работе [102] экспериментально определялись силы, действующие на цилиндрический снаряд с коническим оголовком (угол раствора конуса 60⁰) при его проникании в глину в диапазоне скоростей удара от 3 до 6,1 м/с. Была предложена аналитическая модель проникания, учитывающая сдвиговую прочность грунта и трение на поверхности снаряда. Так как

скорости удара были невелики, то грунт считался несжимаемым. Полученные аналитические зависимости численно интегрировались. Авторами было отмечено хорошее совпадение экспериментальных и аналитических результатов и высказано предположение, что данная методика может быть пригодна для определения прочности на сдвиг по известной скорости удара и максимальной глубине проникания.

Ю.К. Бивин [21,22,23,24,25,26,27] провел значительное количество экспериментов по прониканию ударников различной формы в пластилин, моделирующий глинистую среду. В работе [25] были определены силы сопротивления прониканию для конусов с углами раствора 2α равными 30° , 60° , 90° , 180° в диапазоне скоростей до 20м/с. Было отмечено, что максимальная сила сопротивления достигается при полном погружении конической части ударника и является степенной функцией скорости удара

 $F_{\text{max}} = B V^{\beta}$

где β изменяется от 0,19 до 0,275 при изменении угла раствора конуса α от 0 до 180⁰.

Исследование влияние масштабного фактора проводилось путем сравнения результатов для ударников различных диаметров. Получено, что при изменении диаметра ударника в 5 раз, удельная сила, отнесенная к площади поверхности конуса, практически не изменяется.

В работе [26] проводилось изучение проникания конических ударников в пластилин в диапазоне скоростей удара 30 – 300 м/с. Был предложен метод определения максимальных касательных напряжений τ_s , возникающих в грунте при внедрении конусов, по экспериментальным зависимостям максимальной глубины внедрения от скорости удара в предположении, что сила сопротивления внедрению определяется только действием касательных напряжений на поверхности внедряющегося тела, а скоростным напором (пропорциональным квадрату скорости) можно пренебречь. Получено что в диапазоне скоростей выше 20 м/с τ_s не зависит от скорости удара и равно

0,21 МПа. Однако в работе [32] на установке РСГ получены значительно большие значения сопротивления сдвигу для пластилина.

В работе [27] по результатам измерения конечной глубины проникания в пластилин конусов с углами полураствора 15[°], 30[°], 45[°] и 90[°] определены параметры уравнения проникания в форме Понселе:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} + \delta$$

где F – сила сопротивления, S – площадь сечения ударника, ρ_0 плотность пластилина, V_0 – скорость удара. Эксперименты проводились при скоростях удара от 50 до 400 м/с. Получено, что экспериментальные значения параметра C близки к рассчитанным при установившемся обтекании тела несжимаемой жидкостью. Параметр b, связанный с прочностью среды близок к 50 КПа.

В работе Ю.К. Бивина [28] представлены результаты исследования проникания твердых тел в сыпучие среды в диапазоне скоростей от дозвуковых до сверхзвуковых. В опытах использовался кварцевый песок Люберецкого карьера с размером частиц от 0,2 до 0,315мм и песок, полученный дробленем гранита с размерами частиц 1,6-2мм, 1-1,6мм, 0,63-1мм, 0,315-0,63мм, 0,2-0,315мм и с порошком (размер частиц меньше 0,16мм). Определялось влияние скорости и гранулометрического состава на характеристики проникания и поведения среды при различных вариантах формирования мишени. Разгон тел до требуемых скоростей производился на одноступенчатой пневматической пушке калибром 10мм. Ударники представляли собой стальные шарики диаметром 10мм. Песок помещался в контейнер из оргстекла толщиной 24мм. В контейнер вставлялись рамки с закрепленной на них пленкой или калькой, что позволяло определять глубину внедрения в песок. Построена зависимость максимальной глубины проникания отнесенной к диаметру шарика от скорости удара.

Также проводились опыты с конусом, угол полураствора которого составил 30⁰, а диаметр 10мм при массе 5,5гр. Показана зависимость глубины проникания ударника от удельной плотности песка при скорости

соударения 250м/с. Авторами сделан вывод, что при увеличении удельной плотности, (с уменьшением размера частиц песка), глубина проникания уменьшается. Особенно это заметно на пылевидной среде. Для нее при увеличении плотности на 12% глубина проникания уменьшилась примерно в 2 раза. Глубина проникания для кварцевого и гранитного песка одинакового гранулометрического состава отличаются мало, однако отмечается заметное влияние большей прочности зерен кварца, при этом глубина проникания в него становится меньше.

В работе [23] проведено исследование проникания конических и эквивалентных им звездообразных тел в пластилин и песок в диапазоне скоростей 50 – 500 м/с. По экспериментальным зависимостям максимальной глубины проникания от скорости удара были определены коэффициенты сопротивления для конусов ($2\alpha = 26^{0}$, 60^{0}) и звездообразных тел. Получено, что звездообразные тела обладают большим сопротивлением, чем эквивалентные им конусы вращения.

В работе [65] определялся предел прочности грунта на сдвиг τ_s при внедрении конуса в пластилин со скоростями до 180 м/с. Измерения ускорений при проникании проводились в прямых экспериментах с помощью пьезопреобразователя, размещенного на поверхности конической части ударника. Показано, что зависимость сдвиговой прочности τ_s от скорости внедрения имеет ярко выраженный максимум 0,2 МПа при скоростях удара 10–20 м/с, при дальнейшем росте скорости τ_s падает и при V₀=100 м/с практически равна нулю. Однако полученные в этой работе результаты не согласуются с данными Ю.К.Бивина и результатами А.М. Брагова и др.[32].

В работах [34,35,36] проводилось исследование проникания конических ударников в пластилин. Эксперименты с коническими ударниками (угол раствора 2α=30⁰) проводились при скоростях удара от 20 до 86 м/с. Измерялись силы сопротивления на различных участках внедрения (нестационарном и квазистационарном). По полученным данным построены зависимости коэффициента сопротивления и параметра сдвиговой прочности

грунта от скорости в двухчленном уравнении Понселе. Выявлено, что с ростом скорости удар коэффициент сопротивления уменьшается до значения 0,5, а параметр сдвиговой прочности пластилина растет от значения 0,03 МПа до 0,12 МПа при увеличении скорости от 20 м/с до 80 м/с.

В работе В.А.Лагунова и В.А.Степанова [67] проводились эксперименты по изучению начальной стадии внедрения цилиндрических ударников с плоским торцем в сухой песок со скоростями до 1000 м/с. На основании экспериментальных данных, полученных с использованием высокоскоростной кино- и рентгеновской съемки, тремя различными способами была определена ударная адиабата сухого песка в диапазоне до 5 ГПа. Зависимость скорости ударной волны *D* от массовой скорости *U* выражаетс уранением

D=50024L

В работе [52] изучалась зависимость удельного сопротивления статическому вдавливанию и динамическому внедрению плоского штампа в сухой песок насыпной плотности 1500 кг/м³ при скоростях удара от 0 до 20 м/с. Из экспериментальных данных получена зависимость удельного сопротивления от скорости внедрения в виде:

PG6(BQ) 0²

где *P* - удельное сопротивление в МПа, *V* – скорость удара в м/с.

М.Форрестол [107,108,110] в обращенных экспериментах исследовал проникание ударников с коническими и оживальными головными частями в мишень из искусственного мягкого песчаника (состав 90% кварцевого песка и 10% связующих добавок). Были определены максимальные силы сопротивления для конических ударников с углом раствора $2\alpha=28^{\circ}07'$ и $2\alpha=37^{\circ}$ в диапазоне скоростей от 200 до 1200 м/с. Эти результаты аппроксимировались степенной зависимостью

 $F_{\max} = K V'$

где *K*=221, n=1,36 для конуса 2α=28⁰07′ и *K*=136, n=1,32 для конуса 2α=37⁰ (*F*_{max} - в кH, а *V* - в км/с).

Для ударников с оживальными головными частями с отношением радиуса оживала к калибру равному 6 в диапазоне скоростей от 0,2 км/с до 0,5 км/с максимальная сила сопротивления практически постоянна и составляет величину 20 - 22 кH, а при скоростях в диапазоне 0,5 - 1,2 км/с получена степенная зависимость $F=KV^n$ с коэффициентами K=109, n=1,29. Для ударника с оживальной головной частью с отношением радиуса оживала к калибру равному 3 получено, что в диапазоне скоростей от 600 м/с до 1140 м/с K=148, n=1,18, а при скоростях удара выше 1140 м/с K=134, n=1,98.

В работах М.Форрестола и других [109,110,123] была предложена аналитическая модель расширения сферической полости, основанная на гипотезе тонких сечений. Проводилось сравнение теоретических результатов с результатми модельных и полномасштабных экспериментов. Получено хорошее совпадение вычисленных и измеренных в эксперименте сил.

В работе В.А.Велданова [37] предложена экспериментальнотеоретическая методика определения параметров движения проникающего тела в структурно-неоднородных средах (грунт и бетон). В основу этой методики положена гипотеза о локальности взаимодействия: удельное нормальное и касательное сопротивление в любой точке на поверхности тела, зависит от физико-механических свойств среды и нормальной составляющей скорости этой точки (проекции ее скорости на нормаль к поверхности тела). Экспериментально показано, что для исследованных сред нормальное сопротивление (давление) в любой точке на поверхности проникающего тела представляет в общем виде трехчленную квадратичную зависимость от нормальной составляющей скорости точки. Коэффициенты этой зависимости находятся из экспериментальных результатов, а также из решения задач проникания методами механики сплошной среды.

В работе В.А. Велданова с соавторами [38] представлены расчетные и экспериментальная методики определения динамики проникания недеформируемых или слабодеформируемых ударников в грунтовые преграды. Одна из расчетных методик базируется на использовании
эмпирических зависимостей для вычисления механических напряжений на поверхности контакта ударника с преградой, а другая - на численном моделировании процесса проникания в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. Экспериментальное определение динамики движения преграде осуществлялось ударника В С использованием пьезоакселерометрии. В результате обработки экспериментальных данных получены параметры, характеризующие физико-механические свойства мишени. В эксперименте использовался ударник диаметром 40мм. Его полная масса менялась в диапазоне от 0,53 до 0,59кг (в зависимости от формы). Пластилиновый блок-мишень имел размеры 0,6*0,6*1,5м. Эксперименты проводились для конусов с углами раствора 30^{0} и 60^{0} .

Авторы разделили процесс проникания на 2 этапа На первом этапе происходит увеличение абсолютного значения ускорения ударников в связи с возрастанием площади контакта головной части с пластилином, на втором этапе абсолютное значение ускорения монотонно уменьшается. Максимум перегрузки, испытываемой ударниками, достигается при их проникании в пластилин на глубину, равную высоте конической головной части. Для ударника с углом раствора конуса 60° максимальная перегрузка примерно на 20% выше, чем при 30° .

В экспериментах В.А Бердникова и др [18] изучалось проникание в песок конусов с углами полураствора $\alpha = 10^{\circ}$, 15° , 25° , 30° и 90° при скоростях внедрения от 100 до 1000 м/с. С помощью рентгеноимпульсной и высокоскоростной киносъемки процесса проникания получены зависимости коэффициента сопротивления C_x от угла раствора конуса, скорости удара и влажности песка на квазистационарной фазе проникания. Выявлено также влияние влажности грунта на размеры образующейся каверны.

В работах М.В.Каминского и др [50,54,55] исследовалось формирование каверны в песчаном грунте. В экспериментах получено, что при увеличении диаметра кавитирующего сечения в восемь раз, диаметр каверны возрастает

на 30 %. По результатам численных расчетах определено, что масштабный эффект может быть объяснен вязкостью среды.

В работе Дж. Коллинза и Р. Сиераковского. [101] использовались цилиндрические стальные ударники диаметром 20мм из стали длиной от 0,02 до 0,23м. Ударники выстреливались горизонтально из 20мм газовой пушки в ящик с открытым верхом длиной 1.2м, шириной и высотой 0,15*0,4м, заполненный песком. Песок просеивали через стандартное сито №25. Соударение происходило под прямым углом. Эксперименты проводились с сухим и влажным песком с авиабазы Eglin(Флорида) при скоростях удара около 210, 330 и 400м/с. Регистрация движения ударника в мишени осуществлялась с использованием 4-х рентгеновских импульсных камер, расположенных вдоль оси контейнера с песком на расстоянии 0,55м от нее. Для регистрации движения песка, использовались стальные маркеры (1,5мм). Регистрация процесса проникания осуществлялась на пленку, расположенную под ящиком. По результатам съемки до и во время эксперимента по перемещению стальных маркеров можно судить о движении песка в контейнере. Дополнительно в ящике располагались на определенных расстояниях круговые ВИТКИ медного провода, служившие ИЗ индукционными датчиками. С помощью данных витков регистрировались моменты прохождения намагниченных до 150 Гс стальных ударников. Запуск рентгеновских камер осуществлялся от фольговых датчиков. Измерение скорости удара проводилось с использованием специальных экранов на бумажной основе, расположенных перед контейнером с песком, на определенных расстояниях. Полученные значения коэффициента С_D изменялись в диапазоне от 0,5 до 2,2 при трех скоростях. Также был проведен расчет С_D из которого следует, что С_D должен убывать с ростом скорости от 4 при 0 м/с до 1,25 при 304м/с. К сожалению в работе не приведены плотность, влажность песка, его гранулометрический состав и массы ударников, что затрудняет сравнение.

В работе [132] проводились эксперименты с песком, просеянным через стандартное сито №25 для удаления более крупных частиц. Большинство экспериментов проводилось с сухим песком. Некоторые эксперименты проводились с влажным песком и несколько экспериментов проведено с водой.

Для регистрации положения ударника в мишени использовалось от 5 до 7 импульсных рентгеновских трубок, расположенных вдоль траектории движения ударника. Дополнительно использовались электромагнитные датчики в виде круговых витков, реагирующих на прохождение через них намагниченных ударников. В работе использовались ударники в виде цилиндров диаметром 20мм и длиной от 0,15 до 0,38м. Ударники выстреливались вертикально вниз из пороховой пушки калибром 20мм в контейнер с песком высотой 2,25м, длиной 0,27м и шириной 0,16м. Боковые стенки контейнера были сделаны из алюминиевых листов толщиной 2,3мм на стальном каркасе. Верхняя сторона контейнера закрывалась тканью. Скорость удара измерялась с помощью двух экранов на бумажной основе, расположенных на расстоянии 0,61м друг от друга. В экспериментах с влажным песком песок доводился до водонасыщенного состояния.

Проведено исследование проникания цилиндрических ударников в сухой песок, водонасыщенный песок и воду. Полученные экспериментальные данные показали, что C_D менялся в диапазон от 1 до 2,5. Прямой зависимости C_D от скорости ударника не выявлено.

В работе [99] описывается разработанная методика цифровой спекл радиографии. Данная методика использовалась для измерения полей внутренних течений при проникании в песок ударников на скоростях порядка 200м/с. Авторы используют технику кросскорелляции цифровых изображений, полученных с использованием рентгеносъёмки. Для получения спекла авторы в контейнер с песком, вдоль оси, добавляют свинцовую крошку. При внедрении ударника происходит смещение песка вместе со свинцовой крошкой. На снимке видны частицы свинца в виде белых пятен на черном фоне. Они и образуют спекл, который обрабатывается по алгоритму кросскорреляции цифрового изображения. Сравнивая информацию базового спекла с уже деформированным, авторы получают информацию о движение песка.

В экспериментах использовались ударники длиной 100мм и диаметром 10мм с оголовками различной формы: с плоским торцем, оживалом и полусферой. Их разгон до скоростей 200±4 м/с осуществлялся с помощью легкогазовой пушки. Песок с размерами частиц 0,6-1,6мм помещался в контейнер длиной 150мм и диаметром 100мм. Построены распределения скоростей частиц песка при проникании ударников.

В работе японских авторов К. Ватанабе и др. [140] представлены эксперименты по прониканию пластин из латуни и нержавеющей стали в сухой песок с размерами частиц 0,1-1мм в диапазоне скоростей 150-1400м/с. Плотность песка составила 1,49-1,56 кг/м³, пористость 40-43%.

Эксперименты проводились на установке состоящей из пороховой пушки калибра 15мм. Ударник, представляющий пластину диаметром 15мм и толщиной 5мм, был закреплен на поликарбонатовом поддоне с общей массой 12 и 12,5г. Выстрел производился вертикально в контейнеры различного размера, заполненные сухим песком. Перемещение ударника в контейнере фиксировалось при разрывании ударником оптических волокон толщиной 0,2мм. Волокна располагались в контейнере с песком поперек направления движения ударника с интервалом 20мм. Через волокна пропускался свет от светодиодов, прохождение которого фиксировалось фотоприемниками.

Начальная проникания И формирование выброса, стадия фиксировалось С помощью высокоскоростной съемки. Кроме того фиксировалось распределение максимальных уровней давления на стенках контейнера с помощью специальной чувствительной пленки. Получено, что с ростом скорости максимальный уровень давления растет. Изучалось

образование выброса в момент удара. Обнаружено сильное влияние стенок контейнера на поведение выброса.

В экспериментах также определялась максимальная глубина внедрения. Для обоих типов ударников (латунь и нержавеющая сталь) максимальная глубина внедрения достигалась при скоростях удара около 400 м/с. Отмечено, что при скоростях удара более 450 м/с ударник деформировался пластически и вследствие этого максимальная глубина внедрения уменьшалась с ростом скорости удара.

В экспериментах обнаружено наличие зоны раздробленного и измельченного песка на ударниках, извлеченных из контейнера после экспериметов. На плоском торце пластины-ударника формировалась присоединённая масса в виде конуса из измельченного и уплотненного песка. Угол раствора конуса уменьшался от 100⁰ до 60⁰ с ростом скорости от 200 до 400 м/с. Плотность песка в данном конусе лежит в пределах 2-2,6 г/см³ и не зависит от скорости.

В работе [132] представлены результаты экспериментальных исследований по прониканию ударников различной формы (сфера, цилиндр и др.) в песок в диапазоне скоростей 0,85-2,92 км/с. Ударники разгонялись в поддонах в стволе легкогазовой пушки калибром 31 мм с электрическим подогревом рабочего газа (водорода). Плотность песка составляла 1820кг/м³. Ударники были изготовлены из стали и сплава ВНЖ. В процессе проведения экспериментов с помощью рам-мишеней с проволочками определялось перемещение ударников внутри мишени. С помощью пьезоэлектрических датчиков измерялось давление на заднюю стенку контейнера при выходе на нее волны сжатия. Определялась критическая скорость - т.е. скорость, при которой глубина проникания максимальна. Отмечается, что при скоростях до 1,7 км/с глубина проникания растет с ростом скорости удара. При дальнейшем увеличении скорости глубина внедрения уменьшается из-за пластического деформирования ударника и изменения его формы.

Определено, что критическая скорость зависит от размеров и прочности материала ударника, его формы и скорости удара.

Также необходимо отметить серию работ Дж.Борга с соавторами [90,91,92,93]. В работе [90]. был проведен ряд экспериментов, в которых ударники в форме цилиндра с оголовками различной формы запускались в песчаные мишени со скоростями от 70 до 150 м/с. Ударники запускались вдоль смотрового окна, которое позволяло записывать процесс проникания с помощью высокоскоростной камеры. Импульсы напряжений в волне сжатия измерялись с помощью пьезоэлектрических датчиков. При проникании ударника в песок с помощью метода PIV строились поля скоростей частиц песка. Наблюдалась двухволновая структура: первая волна - волна сжатия движется с объемной скоростью звука в песке, вторая волна - разрушения (дробления), которая движется со скоростью ударника. Были построены зависимости давления от времени. Во время экспериментов авторы наблюдали уплотнение песка около ударника и дробление песка на протяжении нескольких диаметров носовой части ударника. Авторами сделан вывод о том, что изменение формы ударника влияет на размер области дробления.

В статье [92] проводилось численное моделирование проникания стержня длиной 11,4 см и диаметром 0,9 см и массой 49,9 г. в песок со скоростью 366 м/с. Исследовано влияние состава песка на эффективность проникания в него ударника. В качестве среды моделировался мелкий песок, и смесь мелкого песка с гравийной крошкой. Размеры частиц составляли 0,224 мм, а плотность 1,55 г/см³. Получено распределение давления в песке под действием ударника и зависимость скорости ударника в песке от времени. По результатам моделирования отмечено, что ударник замедлился при скоростях в диапазоне от 360 до 200 м/с в течение 400 мкс. Результаты численных расчетов сравнивались С экспериментальными данными. Получено их хорошее качественное и количественное соответствие.

Отмечена полезность вычислительного эксперимента в анализе задач проникания твердых деформируемых тел в грунтовые среды.

В работе [93] авторы провели серию экспериментов по внедрению ударников различной формы в сухой песок. Для регистрации скорости движения частиц использовалась высокоскоростная фотосьемка и технология PIV. Была проведена серия из 30 экспериментов в диапазоне скоростей от 30 до 100 м/с, с использованием как цилиндрических, так и сферических ударников. Ударник длиной 7,6см и диаметром 3,2мм был выполнен из прутка латуни. В качестве мишени использовался сухой песок плотностью 1,56 г / см³, с размерами частиц 0,45-0,55мм, помещенный в прозрачный контейнер из поликарбоната с толщиной стенок 1,9см. Выстрел проводился вдоль стенки контейнера так чтобы ударник попадал в объектив фотокамеры Photron RS CMOS. Средняя глубина проникания во всех экспериментах составила 20,5см. Авторами с помощью технологии PIV построены изображения полей распределения скорости частиц в разные моменты времени. Авторы подчеркивают, что при изменении размеров ударника и его формы, меняется размеры каверны, а скорость формирования каверны в 25раз меньше скорости полета ударника.

Авторами [91] была проведена серия экспериментов по прониканию цилиндрических и сферических ударников в сухой песок в диапазоне скоростей от 30 до 200 м/с.

Для регистрации скорости движения частиц использовалась высокоскоростная фотосьемка и технология PIV. В качестве мишени использовался сухой песок плотностью 1,56 г / см³, с размерами частиц 0,45-0,55мм, помещенный в прозрачный контейнер с размерами 35х25х18см из поликарбоната с толщиной стенок 1см. Песок состоял на 99% из чистого кварца для достижения четкости изображения. Выстрел проводился вдоль стенки контейнера так чтобы ударник попадал в объектив высокоскоростной кинокамеры Photron RS CMOS. Цилиндрический ударник длиной 7,6см и диаметром 3,1мм был выполнен из прутка латуни. Сферический ударник

представлял собой медную сферу диаметром 4мм. Также для измерения напряжений в песок помещались кварцевые датчики на глубину 4,5см и 2,1см в стороне от оси удара. По результатам экспериментов были построены поля скоростей а также получены напряжения в песке с кварцевых датчиков. Средняя глубина проникания во всех экспериментах составила 20,5 см для цилиндрических ударников и 6±0,5 см для сферических.

Обширные исследования проникания ударников в песок провел С.Блесс [87,88,89]. В работе [87] с соавторами представлены результаты исследований проникания полусферических и цилиндрических ударников в сухой песок плотностью 1,51-1,56 г/см³. Измерялась конечная глубина внедрения. Скорость удара варьировалась в диапазоне от 300 до 600 м/с. Четыре эксперимента были проведены с пулями М2 калибра 12,7 мм при скоростях 300-360 м/с. Замедление пули регистрировалось с помощью интерферометра PDV. Уменьшение скорости пули линейно зависело от глубины внедрения. По результатам измерения конечной глубины внедрения для полусферы и цилиндра с плоским торцем делается вывод о том, что конечная глубина внедрения не зависит от скорости удара. На основании тех же экспериментов в работе [88] делается вывод, что конечная глубина внедрения зависит от типа и плотности песка и плотности ударника.

В исследовании [89] для измерения замедления ударников при проникании также применялся интерферометр PDV. В качестве ударников использовались стальные шарики диаметром 14 мм. В качестве мишени использовался сухой песок с плотностью 1,82 г/см³ и 1,59 г/см³, водонасыщенный песок 2,12 г/см³ и 1,99 г/см³. Также исследовалось проникание в смесь дробленого кварца и масла плотностью 1,52 г/см³.

Скорость удара менялась от 166 до 306 м/с. Были получены зависимости скорости внедрения от времени. Для двучленного уравнения Понселе определялись коэффициенты сопротивления *C* и параметры прочности R. Для разных типов сред коэффициент *C* варьировался в

диапазоне от 0,8 до 1,6, а параметр прочности в двухчленном уравнении Понселе R изменялся в диапазоне от 0 до 22 МПа.Отмечается, что начальный участок проникания(при скорости проникания 80-100м/с) описывается уравнением Понселе с одними параметрами С и R, на конечном участке при скорости внедрения меньше 80 м/с для описания замедления шариков и предсказание конечной глубины внедрения требуется использование других величин C и R. На начальном участке проникания скорость линейно уменьшается с глубиной внедрения. По результатам экспериментальных исследований также отмечается, что с ростом плотности песка сила сопротивления растет, а для водонасыщенного песка она уменьшается.

В работе В.В.Баландина [8] представлены результаты экспериментальных исследований проникания ударников с различными головными частями в сухой и водонасыщенный песок естественного состава 1750 кг/м³. В около обращенных экспериментах с С плотностью использованием метода мерного стержня определялись максимальные силы, действующие на проникающее тело на нестационарном участке внедрения. В прямых экспериментах измерялся коэффициент сопротивления С на квазистационарном участке внедрения.

Выводы по главе 1:

- При изучении процессов соударения твердых тел с преградами широкое распространение получили прямые методы, использующие высокоскоростную кино- и рентгеновскую съемки. Рентгеновская съемка технически более сложна, чем съемка в видимом свете и требует принятия специальных защитных мер. Для высокоскоростной киносъемки наиболее широко используются цифровые многокадровые камеры.
- 2. В обращенных экспериментах наиболее часто используется метод мерного стержня с использованием тензорезисторов, а также акселерометрия. Однако при изучении процессов осесимметричного взаимодействия с грунтовыми средами при относительно низких скоростях удара (до 400 м/с) метод мерного стержня является более предпочтительным потому, что акселерометры достаточно дороги.
- 3. Анализ имеющихся экспериментальных результатов исследования проникания твердых тел в грунтовые среды показал, что даже при среды положительных температурах проникание В грунтовые различной влажности экспериментально изучено весьма фрагментарно - экспериментальные данные относятся к исследованию песчаных сред различной влажности, некоторых глинистых грунтов и модельных сред при нормальных температурах. Для грунтов при температурах ниже $0^{\circ}C$ экспериментальные данные ПО прониканию практически отсутствуют.

Глава 2. Экспериментальный комплекс для исследования процессов соударения твердых тел с грунтовыми средами

Исследование процессов ударного взаимодействия жестких И деформируемых твердых тел с преградами различной физической природы играют важную роль в современной науке и технике. Значительное внимание в проблеме динамики удара уделяется экспериментальным методам изучения ударных явлений, позволяющим устанавливать новые опытные данные и закономерности этих явлений. Подобные исследования требуют наличия оригинальных методик, современного оборудования и приборов для проведения ударных экспериментов И регистрации параметров быстропротекающих процессов.

В работе экспериментальные исследования проникания твердых тел в грунтовые среды проводились с использованием двух методик. Первая из них - методика прямого эксперимента с использованием цифровой многокадровой камеры [10], позволяющая получать кинограмму процесса взаимодействия ударника с грунтовой мишенью, по которой можно построить зависимость глубины проникания от времени, а затем вычислить значения сил и их зависимости от физико-механических свойств грунтов, скорости удара, формы ударника и т.д. Вторая - методика обращенного эксперимента с использованием мерного стержня позволяет измерять интегральные нагрузки на начальном этапе внедрения.

2.1. Методика измерения интегральных нагрузок в прямом эксперименте

2.1.1.Установка для изучения проникания в грунтовые среды в прямой постановке с использованием высокоскоростной фоторегистрации

В НИИ механики Нижегородского университета в 80-х годах прошлого века была разработана и реализована установка для исследования процессов соударения, проникания и пробивания деформируемых твердых тел в широком диапазоне скоростей удара (50 ÷ 800 м/с) [8,10]. В качестве разгонного устройства использовалась газовая пушка калибром 20 мм, регистрация соударения осуществлялась параметров процесса высокоскоростной камерой с зеркальной разверткой ВСК-5. Использование данного оборудования позволило проводить широкий круг исследований процессов ударного взаимодействия, однако, наряду с достоинствами оно обладало существенными недостатками. Основным недостатком являлась зависимость времени экспозиции каждого кадра t_3 от временного интервала между кадрами t_{κ} ($t_{2} = 0.5t_{\kappa}$), что могло приводить к большим погрешностям при измерении перемещений. К тому же технология обработки экспонированных фото пленок и измерения по ним параметров процесса была достаточно трудоемкой. С появлением цифровых многокадровых камер назрела необходимость в модернизации данной установки, которая и была проведена путем замены регистратора ВСК-5 на цифровую восьмикадровую высокоскоростную камеру HSFCpro фирмы РСО (Германия), для которой была модернизирована схема синхронизации [12].

Схема установки приведена на рис.2.1. Для разгона ударников до требуемых скоростей используется газовая пушка калибром 20 мм. Пушка состоит из камеры высокого давления (КВД) (1), двухдиафрагменного затвора (2), соединенного с КВД с помощью короткого патрубка (3), а также электромагнитного пневмоклапана (4), служащего для стравливания рабочего газа из промежуточной камеры затвора при выстреле. В качестве затвора используются две диафрагмы, рассчитанные на половину рабочего

давления каждая. К промежуточной камере пристыковывается ствол (5). На дульный конец ствола навинчивается электромагнитный измеритель скорости (6). Ударник размещается в стволе перед диафрагмами. Вакуумная камера (7) с окнами из оргстекла толщиной 10 мм (8) предназначена для предохранения оборудования и персонала от удара разлетающихся осколков или самого снаряда. Кроме того, при испытании грунтовых сред она защищает помещение от разлета частиц грунта и пыли. Вакуумная камера состоит из двух частей, соединенных с помощью специального хомута. Общая длина камеры 1100 мм, диаметр 400 мм. В камере расположены 4 кронштейна узла крепления мишени (9). Этот узел представляет собой захват с 4-мя лапками, зажимающими мишень (10) с боков (на схеме показан вариант с мишенью в виде контейнера с грунтом). Узел крепления способен в небольших пределах (до 10 мм) перемещаться в направлениях поперек оси камеры, а также изменять наклон мишени относительно оси ствола. Это сделано с целью юстировки мишеней относительно оси ствола пушки. Процесс соударения освещался с помощью двух осветителей (11) через рассеивающий экран (12) и регистрировался высокоскоростной кинокамерой (13).

Использованная для регистрации процессов соударения высокоскоростная камера HSFCpro фирмы PCO (Германия) представляет аппаратно - программный комплекс, состоящий из оптико-электронного блока и рабочей станции для управления камерой и обработки изображений. Рабочая станция представляет собой персональный компьютер с четырьмя профессиональными процессорами регистрации И обработки для изображения. Каждый процессор связан с оптико-электронным блоком оптоволоконным кабелем, что обеспечивает высокую скорость передачи данных. Оптико-электронный блок состоит из четырех идентичных каналов - однокадровых камер типа Dicam pro, объединенных в одном корпусе с общей оптической системой.





Каждый канал способен работать в двухкадровом режиме при длительности экспозиции более 20 нс. Оптические элементы подобраны с высокой точностью и обеспечивают разномасштабность изображений менее 1%. В качестве входного зрачка использовался объектив Nikkor с фокусным расстоянием 70-200 мм. Основные характеристики каждого канала приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Разрешение ПЗС матрицы	1280x1024					
Минимальное время экспозиции (в	3 ns					
однокадровом режиме)						
Минимальное время экспозиции (в	20 ns					
двухкадровом режиме)						
Минимальное время задержки между	500 ns					
двумя повторными экспозициями (в						
двухкадровом режиме)						
Максимальное время задержки между	10 ms					
двумя повторными экспозициями (в						
двухкадровом режиме)						

Запуск устройства осуществляется либо по сигналу с контактного датчика, расположенного на поверхности мишени и замыкаемого при ударе, либо от электромагнитного измерителя скорости. Требуемая задержка запуска вводится при помощи генератора Г5-54.

регистрируемых Для освещения процессов используются две профессиональные фотовспышки Bowens 2068 с регулируемой энергией вспышки (максимальная энергия 1500 Дж). Данные источники света установлены на штативах и могут располагаться как перед вакуумной камерой, так и за ней, что обеспечивает съемку как в отраженном, так и в проходящем свете. Широкие пределы регулирования энергии вспышки позволяют оптимально выбирать экспозицию. Для запуска источников разработана схема, освещения имитирующая работу синхроконтакта фотоаппарата c использованием транзисторного оптрона AOT127A. Включение оптопары АОТ127А осуществляется ОТ второго канала измерителя скорости через генератор импульсов Г5-56.

Полученные изображения процессов ударного взаимодействия сохраняются во внутреннем формате камеры, а также в формате bmp, что позволяет производить измерения перемещения элементов процесса взаимодействия в любом подходящем графическом редакторе.

Описанная выше установка обладает широкими возможностями при регистрации процессов ударного взаимодействия и может быть использована при изучении явлений пробивания преград, измерения запреградной скорости, проникания ударников в протяженные мишени различной физической природы, а также для изучения поведения материалов при высоких скоростях деформирования и больших степенях деформации (например, в эксперименте Тейлора).

В качестве примера использования данной установки на рис.2.2 приведена кинограмма пробития титановой мишени стальным шариком диаметром 12 мм. Скорость удара составляла 353 м/с. Мишенью являлась часть цилиндрической оболочки толщиной 2,5 мм. Интервал между кадрами

составлял 50 мкс, время экспозиции 0,1мкс. Остаточная скорость вылета шарика из мишени составляла 129 м/с. Съемка осуществлялась в отраженном свете. Хорошо видно наличие перед шариком (2) выбитой из мишени (1) пробки (3).



Рис.2.2. Кинограмма пробития титановой мишени стальным шариком диаметром 12 мм. Интервал между кадрами 50 мкс. Скорость удара 353 м/с.

Для получения более высокого контраста можно использовать теневую съемку, которая позволяет с высокой точностью регистрировать контуры процесса. На рис.2.3 приведена последовательность кадров взаимодействия отожженного медного ударника диаметром 9,9 мм и длиной 70 мм со стальным мерным стержнем в модифицированном тесте Тейлора. Интервал между кадрами составлял 25 мкс, время экспозиции 0,1 мкс. 125 м/с. Запуск Скорость удара регистрации происходил ОТ электроконтактного датчика, расположенного на поверхности мерного стержня. Из рисунка 2.3 видно, что использование высокоскоростной кинокамеры HSFCpro позволяет получать изображения процессов ударного взаимодействия хорошего качества.

На рис.2.4 приведена кинограмма проникания цилиндрического стального ударника с полусферической головной частью в грунтовую среду (сухой песок). Интервал между кадрами 70 мкс, время экспозиции 0,2 мкс. Параметры ударника: длина - 100 мм, диаметр -19,8 мм, масса 80 г, скорость удара - 216 м/с.



Рис.2.3 Кинограмма взаимодействия медного ударника диаметром 9,9 мм и длиной 70 мм со стальным мерным стержнем в модифицированном тесте Тейлора. Интервал между кадрами составлял 25 мкс. Скорость удара 125 м/с.



Рис. 2.4. Кинограмма проникания цилиндрического стального ударника с полусферической головной частью в сухой песок. Интервал между кадрами 70 мкс. Скорость удара 216 м/с.

Для определения масштаба съёмки для каждого кадра перед проведением эксперимента (после окончательной наводки на резкость и выставления параметров регистрации - времени экспозиции, интервалов между кадрами и усиления каналов камеры) производилась дополнительная съёмка масштабной линейки, расположенной в плоскости, проходящей через ось ствола газовой пушки, перпендикулярно оси оптической системы цифровой камеры. Затем перемещение торца ударника от кадра к кадру, измеренное в пикселях, определялось с помощью графического редактора. Переход к натуральным величинам осуществлялся умножением на масштаб съёмки. Полученные изображения позволяют построить зависимость глубины ударника от времени (рис.2.5). Погрешность определения перемещений составляет 0,2-0,3 мм, что существенно меньше, чем при регистрации камерой ВСК-5.



Рис. 2.5 Зависимость глубины проникания ударника от времени, определенная по кинограмме на рис2.4

2.1.2. Определение интегральных нагрузок, действующих на ударник на квазистационарном участке внедрения

Для описания процесса проникания ударников в однородные грунтовые среды можно использовать либо двойное дифференцирование полученных зависимостей «время – глубина внедрения», либо интегрирование известного из аэробаллистики уравнения движения [1] в виде

$$-m\frac{dV}{dt} = \frac{\rho_0 S V^2 C}{2} \tag{1}$$

где m – масса ударника, V – скорость ударника в текущий момент времени, S – площадь поперечного сечения ударника, C – безразмерный коэффициент сопротивления. Интегрирование этого уравнения при предположении постоянства S и C приводит к следующей зависимости скорости внедрения V от времени t

$$V(t) = \frac{V_0}{1 + \frac{\rho_0 V_0 SC t}{2m}}$$
(2)

Дальнейшее интегрирование позволяет получить зависимость глубины внедрения X от времени t

$$X = \frac{2m}{\rho_0 SC} \ln(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1)$$
(3)

Полученная неявная (по отношению к С) формула дает возможность вычислить средний коэффициент сопротивления С на интервале времени от 0 до t. По определенному таким образом коэффициенту сопротивления из формул (2) и (3) можно получить значения силы сопротивления внедрению. Данная формула инвариантна к выбору начального момента времени t=0, поэтому он выбирался из условия минимизации влияния нестационарного коэффициента внедрения на значение сопротивления участка С И приблизительно соответствовал моменту погружения головной части ударника в мишень. Глубина внедрения в этот момент времени также приравнивалась нулю. Данное преобразование координаты и времени не сказывалось на виде уравнения движения и его коэффициентах, в том числе и на С. Выбор другого момента начала интегрирования практически не приводит к изменению величины С, меняется лишь величина скорости в момент начала интегрирования V₀. Можно оценить скорость ударника сразу после внедрения головной части. Для этого воспользуемся результатами для нестационарного внедрения полусферических участка оголовков, полученными в обращенном эксперименте (геометрия оголовков в прямом и обращенном эксперименте была одинаковой). На рис.2.6. приведена сила сопротивления внедрению полусферы, вычисленная на основе экспериментальных данных, в сухой песок при скорости удара 401 м/с. Проинтегрируем данную зависимость на участке внедрения головной части для ударника массой 96 г. Изменение скорости ударника за время внедрения головной части составляет 21 м/с. т.е. 5% от скорости удара.



Рис.2.6. Зависимость силы сопротивления внедрению полусферы в сухой песок при скорости удара 401 м/с.

Далее уравнение, выражающее зависимость глубины внедрения от времени, решалось с помощью компьютерной программы в среде программирования Labview (рис.2.7). В ней реализован алгоритм Левенберга-Маркварта поиска корней нелинейного уравнения методом наименьших квадратов. В качестве исходных данных в программу вводится массив экспериментальных данных (t, X), выражающий зависимость глубины проникания от времени, начиная от момента t=0 после погружения головной части ударника. В качестве выходных данных программа выдает значений V_1 и C, где V_1 скорость на момент начала интегрирования после полного погружения головной части ударника в мишень, а C коэффициент сопротивления на этом участке.



Рис.2.7. Интерфейс программы определения коэффициента сопротивления по результатам прямого эксперимента.

2.2. Измерение интегральных нагрузок в обращенном эксперименте.

2.2.1 Установка, реализующая метод мерного стержня

Методика измерения силы сопротивления с помощью мерного стержня [8] предназначена для определения интегральных нагрузок на начальном участке внедрения и сводится к следующему. Контейнер, заполненный грунтом, разгоняется до требуемой скорости и наносит удар по неподвижному оголовку соответствующей формы, закрепленному на мерном стержне. Свойства материала стержня и оголовка должны быть такими, чтобы в них не возникало пластических деформаций при выбранной скорости удара. При этом в стержне формируется упругий импульс сжатия с деформацией $\varepsilon(t)$. Регистрация этого импульса позволяет определить силу *F*, действующую на ударник при взаимодействии с грунтовой мишенью, по известному соотношению $F(t) = E\varepsilon(t)S$, где *E* - модуль упругости стержня, *S* - площадь его поперечного сечения. Таким образом, в этом методе задача измерения сил сопротивления сводится к регистрации импульса упругих деформаций в мерном стержне.

Схема установки, реализующей данный метод, представлена на рис.2.8. Для разгона контейнера с исследуемой грунтовой средой используется газовая пушка (1) калибром 57 мм с двухдиафрагменным затвором (2), работающая на сжатом воздухе или гелии давлением до 15 МПа. Применение газовой пушки позволяет получать стабильные и легко контролируемые скорости соударения в диапазоне от 50 до 500 м/с для контейнеров массой в несколько сотен граммов.

Контейнер представляет собой тонкостенный стакан (3) из алюминиевого сплава или полипропилена, заполненный грунтовой средой (4). Для предотвращения высыпания грунта при температуре выше 0°C в процессе подготовки эксперимента и во время разгона контейнера, передняя часть контейнера закрывается лавсановой пленкой (5) толщиной 0,01 мм.

Пленка фиксируется и поджимается к поверхности грунта с помощью тонкого разрезного кольца из Д16Т (6).

Скорость контейнера определяется с помощью двух электроконтактных датчиков (7), расположенных в отверстиях, высверленных в стволе пушки перед его дульным срезом. Контакты сделаны из изолированного медного провода диаметром 0,5 мм и подключаются к источнику питания, состоящему из двух последовательно соединенных аккумуляторов через делители напряжения R_1/R_2 и $R_3/R4$. Временной интервал между сигналами с электроконтактных датчиков измеряется с помощью осциллографа Agilent DSO 8064. Расстояние между контактами измерителя скорости составляет 750 мм и определяется с точностью 0,5 мм.



Рис.2.8. Схема установки для измерения интегральных нагрузок при внедрении в обращенном эксперименте.

В качестве мерного стержня (8) используется стальной стержень длиной 1,5 м и диаметром 20,5 мм а также стержень диаметром 12 мм. Стержень с диаметром 20,5 мм изготовлен из стали 02H18K9M5T-ИД (ЭП637) с пределом текучести около 2000 МПа, или стержень диаметром 12 мм изготовлен из стали 30XГСА с пределом текучести 700 МПа. Один из торцов мерного стержня 20,5 мм имеет отверстие с резьбой М10, в которое

ввинчивается оголовок необходимой формы (9). Стержни располагаются так, чтобы соударение происходило сразу после полного вылета контейнера из ствола пушки. Подставка, на которой располагается стержень, имеет юстировочные опоры (10), которые позволяют проводить настройку для получения осесимметричного характера взаимодействия. Стержень задним торцом прижат к специальному упору (11), гасящему энергию удара. Для предотвращения разлета грунта и частей контейнера соударение происходит в вакуумной камере (12), к которой присоединен ствол пушки (13) и в которую вставляется мерный стержень (8) с оголовком требуемой формы (9).

Для регистрации упругого импульса в мерном стержне на его боковой поверхности в сечении, находящемся на расстоянии 500 мм от ударяемого торца, наклеено через 90⁰ по окружности четыре тензорезистора (14) номинальным сопротивлением 350 или 400 Ом и базой 3 мм, соединенных последовательно. Тензорезисторы включены в потенциометрическую схему [79] и для уменьшения уровня помех запитываются от четырех последовательно соединенных аккумуляторов общим напряжением 50 В.

При внедрении в контейнер с грунтом на головную часть действует сила F(t), формирующая импульс сжатия в стержне. При отсутствии дисперсии на некотором расстоянии от ударяемого конца, в стержне формируется упругая одномерная волна сжатия. Напряжение σ в этой волне изменяется пропорционально действующей на оголовок силе по закону [57]

 $\sigma(t) = \frac{F(t)}{S}$, где S - площадь поперечного сечения стержня.

Так как мерный стержень в процессе эксперимента остается упругим, то напряжение $\sigma(t)$ и деформация $\varepsilon(t)$ в стержне связаны законом Гука

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t)$$

Деформация в волне сжатия прямо пропорциональна силе, действующей на ударяемый торец стержня

$$\varepsilon(t) = \frac{F(t)}{ES}.$$
 (4)

Как говорилось выше деформация в волне сжатия регистрировалась с помощью тензорезисторов. Так как при малых деформациях (до 0,3 %) они линейны, то изменение сопротивления прямо пропорционально деформации в стержне [79]

$$\frac{\Delta R_{\partial}}{R_{\partial}} = k\varepsilon,$$

где ΔR_{∂} - изменение сопротивления тензорезисторов под действием деформации стержня, R_{∂} - сопротивление тензорезисторов в недеформированном состоянии, *k*- коэффициент тензочувствительности, характеризующий конкретную партию тензорезисторов.

Изменения сопротивления тензорезисторов преобразуют в напряжение с помощью потенциометрической схемы включения (рис.2.9). Эта схема состоит из источника питания постоянного тока напряжением U_n и резисторов: R_{δ} - балластного, R_{κ} - калибровочного и R_{δ} - сопротивления тензорезисторов, включенных в измерительную цепь. Изменение сопротивления тензодатчиков ΔR_{δ} в процессе деформации стержня приводит к изменению напряжения в точке А. Величина получаемого сигнала ΔU на выходе схемы выражается формулой [79]:

$$\Delta U = \frac{R_{\delta}}{R_{\delta} + R_{\delta} + \Delta R_{\delta}} \cdot \frac{\Delta R_{\delta}}{R_{\delta}} U_{A},$$

где U_A - напряжение в точке А.

Если $\Delta R_{\kappa} \ll R_{\partial} u \Delta R_{\partial} \ll R_{\partial}$ формула линеаризуется и упрощается:

$$U = \frac{R_{\delta}}{R_{\delta} + R_{\delta}} k \varepsilon U_{A}$$
⁽⁵⁾



Рис.2.9. Схема включения тензодатчиков в измерительную цепь.

Для проведения калибровки измерительной системы производится имитация изменения сопротивления тензорезисторов на известную величину, путем периодического кратковременного подключения параллельно с тензодатчиками калибровочного сопротивления R_{κ} . Величина этого резистора (около 300 кОм) известна с большой точностью (погрешность его определения составляет 1%).

В отличие от работы [8], где использовалась последовательная схема калибровки, было применено параллельное включение калибровочного резистора. При последовательном подключении калибровочного сопротивления величиной несколько Ом трудно учесть неконтролируемое влияние контактов реле РЭС55 (около 0,1 Ом) и сопротивления присоединения калибровочного резистора.

При подключении этого резистора параллельно тензорезисторам величина сопротивления в измерительном тракте уменьшится на величину ΔR_{κ} , где

$$\Delta R_{\kappa} = R_{\mu} \frac{R_{\mu}}{R_{\mu} + R_{\kappa}}$$

При $R_{\kappa} = 300$ кОм и $R_{\pi} = 1600$ Ом величина ΔR_{κ} составляла 0,5 % от величины R_{π} .

На экране осциллографа изменению сопротивления R_{∂} на величину ΔR_{κ} будет соответствовать скачок напряжения величиной U_{κ} , причем полярность этого сигнала соответствует уменьшению сопротивления тензорезисторов – т.е. сжатию, как и в реальном сигнале.

$$U_{\kappa} = \frac{R_{\delta}}{R_{\delta} + R_{\delta}} \frac{\Delta R_{\kappa}}{R_{\delta}} U_{A}.$$
 (6)

Выражая отсюда U_A , и подставляя в (5), получаем:

$$U = \frac{k \varepsilon R_{\partial}}{\Delta R_{\kappa}} U_{\kappa}.$$

Выражаем деформацию в стержне через U:

$$\varepsilon = \frac{U}{U_{\kappa}} \frac{\Delta R_{\kappa}}{kR_{\rho}} \,. \tag{7}$$

Сила F(t) определяется из (4) и (7):

$$F(t) = SE \frac{\Delta R_{\kappa}}{kR_{\delta}U_{\kappa}} U(t) = SE \frac{R_{\delta}}{k(R_{\delta} + R_{\kappa})U_{\kappa}} U(t).$$
(8)

Зная силу сопротивления внедрению, можно вычислить безразмерную (нормированную) силу, которая на квазистационарном участке внедрения соответствует коэффициенту сопротивления

$$C(t) = \frac{2F(t)}{\rho_0 V_0^2 S(t)},$$
(9)

где ρ_0 – плотность грунта в контейнере, V_0 – скорость удара, S(t) – текущая площадь поперечного сечения зоны контакта «оголовок – грунт».

Непосредственно перед каждым экспериментом производилась калибровка измерительной системы. Калибровочное сопротивление R_{κ} (номинал 300 кОм) и сопротивление тензодатчиков R_{∂} (номинальное сопротивление 1400 Ом или 1600 Ом) измерялись мостом постоянного тока.

Запись информации с тензодатчиков и регистрация моментов срабатывания контактных датчиков измерителя скорости производится с помощью цифрового запоминающего осциллографа DSO 8064 фирмы Agilent. Данный осциллограф представляет персональный компьютер с четырьмя встроенными высокопроизводительными аналого-цифровыми

преобразователями (АЦП). Максимальная частота дискретизации АЦП – 2 ГГц, полоса пропускания входных усилителей – 600 МГц. Данные, полученные в эксперименте, сохраняются на жестком диске осциллографа.

Обработка экспериментальных данных осуществляется на персональном разработанной компьютере использованием программы, С В среде графического программирования Labview. Интерфейс данной программы приведен на рис.2.10. Программа позволяет выделять интересующий участок записи экспериментальной информации, устанавливать нулевой уровень сигнала, пересчитывать экспериментальные данные в значения силы сопротивления с использованием данных калибровки измерительного тракта. Для устранения высокочастотных шумов, связанных с квантованием сигнала, в программу введен настраиваемый фильтр низкой частоты. Зависимость силы сопротивления от времени записывается в текстовый файл в виде двумерного массива (t,F).



Рис.2.10. Интерфейс программы обработки результатов обращенного эксперимента.

2.2.2 Погрешности определения интегральных нагрузок в обращенном эксперименте

Определение интегральных нагрузок в обращенных экспериментах по зарегистрированному сигналу производилось по формуле (8). Поэтому абсолютная ошибка определения силы сопротивления дается выражением:

$$\Delta F = \frac{E}{k} \left(\frac{R_{\partial}U}{(R_{\partial} + R_{\kappa})U_{\kappa}} \Delta S + \frac{SR_{\partial}U}{(R_{\partial} + R_{\kappa})^{2}U_{\kappa}} \Delta (R_{\kappa}) + \frac{SR_{\partial}}{(R_{\partial} + R_{\kappa})U_{\kappa}} \Delta U + \right) + \frac{SU}{(R_{\partial} + R_{\kappa})U_{\kappa}} \Delta R_{\partial} (1 + \frac{R_{\partial}}{R_{\partial} + R_{\kappa}}) + \frac{SR_{\partial}U}{(R_{\partial} + R_{\kappa})U_{\kappa}^{2}} \Delta U_{\kappa} \right)$$

Относительная ошибка определения силы:

$$\delta F = \delta S + \delta(R_{\kappa}) + \delta U + \delta R_{\delta} (1 + \frac{R_{\delta}}{R_{\delta} + R_{\kappa}}) + \delta U_{\kappa},$$

здесь: ΔS и δS - абсолютная и относительная ошибки измерения площади стержня, $\Delta(R_{\kappa})$ и $\delta(R_{\kappa})$ - абсолютная и относительная ошибки измерения калибровочного сопротивления, ΔU и δU - абсолютная и относительная ошибки измерения сигнала на экране осциллографа, ΔR_{∂} и δR_{∂} - абсолютная и относительная ошибки измерения сопротивления датчиков, ΔU_{κ} и δU_{κ} абсолютная и относительная погрешности измерения сигнала калибровки на экране осциллографа.

Для всех экспериментов абсолютные и относительные погрешности измерения площади стержня *S*, калибровочного сопротивления R_{κ} и сопротивления датчиков R_{∂} были одинаковы. Сопротивления датчиков R_{∂} измерялись с погрешностью $\Delta R_{\partial} = 0,1$ Ом, калибровочные сопротивления R_{κ} измерялись с погрешностью $\Delta(R_{\kappa}) = 1$ Ом. Величина сопротивления датчиков $R_{\partial} = 1400$ Ом, калибровочного сопротивления $R_{\kappa} = 297$ кОм. Таким образом, $\delta R_{\partial} = 0,007\%$, $\delta R_{\kappa} = 0,0003\%$. Данными величинами погрешностей можно пренебречь. Основную погрешность в определение силы вносят измерение площади поперечного сечения стержня и измерения напряжения с помощью осциллографа. Площадь сечения стержня определялась по формуле:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$
, следовательно $\Delta S = \frac{\pi D}{2} \Delta D$, а $\delta S = 2\delta D$, где D - диаметр стержня.

Диаметр стержня *D* был равен 20,5 мм и измерялся штангенциркулем с погрешностью ΔD =0,1 мм. Следовательно, $\Delta S = 3 \text{ мм}^2$, а $\delta S = 1 \%$. Величины относительной ошибки измерения напряжения осциллографом δU_{κ} и δU составляли 2,5%. Таким образом относительная ошибка измерения силы сопротивления не превышает 7%.

Безразмерная (нормированная) сила в обращенных экспериментах определялась по формуле (9). Следовательно, погрешность определения С дается выражением

$$\Delta C = 2 \left(\frac{\Delta F(t)}{\rho_0 V_0^2 S(t)} + \frac{F(t)}{\rho_0^2 V_0^2 S(t)} \Delta \rho_0 + \frac{2F(t)}{\rho_0 V_0^3 S(t)} \Delta V_0 + \frac{F(t)}{\rho_0 V_0^2 S^2(t)} \Delta S(t) \right).$$

Произведя несложные преобразования, получаем

$$\Delta C = \frac{2F(t)}{\rho_0 V_0^2 S(t)} \left(\delta F(t) + \delta \rho_0 + 2\delta V_0 + \delta S(t) \right) = C_x \left(\delta F(t) + \delta \rho_0 + 2\delta V_0 + \delta S(t) \right),$$

а относительная погрешность $\partial C = (\partial F(t) + \partial \rho_0 + 2\partial V_0 + \partial S(t)).$

Относительная ошибка измерения площади сечения *S* составляла 1%, ошибка измерения плотности равна 0,5%. Ошибка измерения скорости удара *V* определялась точностью измерения базы измерителя скорости. При расстоянии между контактами 750 мм, измеренном с погрешностью 5 мм, относительная ошибка измерения скорости *V* составила менее 1%. Относительная ошибка измерения коэффициента сопротивления *C* составила 10%.

Выводы по главе 2

- Разработана и реализована методика измерения глубины внедрения ударников от времени при проникании в грунтовые среды в прямом эксперименте с использованием высокоскоростной съемки.
- 2. Предложена методика обработки полученных зависимостей глубины дает времени, которая проникания ОТ возможность вычислить коэффициент сопротивления С на квазистационарном участке проникания. Проведен численный анализ данной методики для определении коэффициента сопротивления внедрению. Показано, что методика прямого эксперимента с удовлетворительной для практики точностью позволяет вычислять коэффициент сопротивления внедрению на квазистационарном участке.
- 3. Для непосредственного определения интегральных нагрузок на начальном, нестационарном участке внедрения в грунтовые среды модифицирована методика обращенного эксперимента С использованием мерного стержня, которая существенно упрощает процедуру определения интегральных нагрузок и повышает точность эксперимента.

Глава З.Экспериментальное исследование проникания твердых тел

в грунтовые среды

Исследование проникания твердых и деформируемых тел в грунтовые преграды направлено на решение двух задач: определение сил сопротивления внедрению оценка максимальной глубины проникания. Силы И сопротивления, действующие на нестационарном участке внедрения в грунт, могут значительно превышать силы, действующие на проникающее тело, на квазистационарном участке внедрения. Определение сил сопротивления важно при конструировании проникающих тел в связи с необходимостью задания требуемых прочностных характеристик конструкционных материалов. Так как нестационарный участок внедрения достаточно короткий, то его наличие мало влияет на конечную глубину внедрения, однако его максимум может являться определяющим при расчете НДС и прочности внедряющейся конструкций. Для определения конечной глубины внедрения необходимо знать силы на квазистационарном участке внедрения. В работе [8] были определены коэффициенты сопротивления С для ударников различной формы, в том числе полусферических. Однако при этом не было учтено влияние нестационарного участка внедрения и волн, отраженных от стенок контейнера с грунтом, на измеряемые интегральные нагрузки. В данной работе предложена методика определения С. учитывающая эти факторы.

3.1. Исследование проникание полусферических ударников в сухой песок

в прямой постановке

3.1.1. Условия проведения экспериментов

Эксперименты проводились с сухой песчаной смесью естественного состава, из которой были удалены частицы крупнее 1 мм и менее 0,1 мм. Гранулометрический состав песка приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Гранулометрический состав песка в ударных экспериментах

Размер	,0>R>0,6	0,63>R>0,	0,4>R>0,31	0,315>R>0,	0,2>R>0,1	0,16>R>0,
зерен	3	4	5	2	6	1
, MM						
Состав	9,8	29,7	20,5	29,5	7	3,5
, %						

Прямые эксперименты проводились с песком плотностью $1750\pm10 \text{ кг/m}^3$.В этих экспериментах использовались ударники с массами $60\pm0,5$ г, $80\pm0,5$ г и $96\pm0,5$ г, изготовленные из стали 45 с HR_C40. Диаметр ударников составлял 19,8 мм, радиус полусферического оголовка - 10 мм. Песок располагался в контейнере, который представляет собой стальной цилиндр с внутренним диаметром 130 мм и длиной 350 мм. Толщина его стенок и дна составляет 5 мм. Для предотвращения высыпания песка его свободная поверхность фиксировалась с помощью полиэтиленовой пленки толщиной 0,01 мм.

3.1.2. Результаты численного анализа экспериментальной методики

С целью оценки влияния на интегральные нагрузки геометрических размеров ударников и контейнеров с грунтом, а также для более глубокого анализа процессов, происходящих при соударении твердых тел с грунтом были выполнены численные расчеты [61,62] проникания в песчаный грунт, размещенный в стальном контейнере ударника массой *m* с начальной скоростью V₀. В расчетах определялся временной интервал, на котором изменение силы сопротивления пропорционально квадрату скорости необходимо внедрения. Для ЭТОГО было оценить длительность нестационарной и квазистационарной стадий изменения силы сопротивления внедрению, а также время, начиная с которого будет существенным влияние на силу сопротивления волн сжатия, отраженных от стенок контейнера.

Расчеты проводились с использованием программного комплекса «Динамика-2» [5], реализующего математическую модель динамики грунтовой среды С.С. Григоряна [33]. Основные соотношения модели записываются в цилиндрической системе координат в виде системы дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса и максимальной плотности, достигнутой в процессе активного нагружения грунта, а также уравнений теории пластического течения с условием пластичности Мизеса [41]

$$d\rho/dt + \rho(u_{r,r} + u_{z,z}) = -(\rho u_r)/r,$$

$$\rho du_r/dt - \sigma_{rr,r} - \sigma_{rz,z} = (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})/r,$$

$$\rho du_z/dt - \sigma_{rz,r} - \sigma_{zz,z} = (\sigma_{rz})/r,$$

$$d\rho_*/dt = d\rho/dtH(\rho - \rho_*)H(d\rho/dt),$$

$$D_J s_{ij} + \lambda s_{ij} = 2Ge_{ij}, (i, j = r, z),$$

$$s_{ij} s^{ij} \leq \frac{2}{3}\sigma_T^2,$$
(10)

где обозначено: t – время, ρ и ρ_* – начальная, текущая и максимальная плотность, достигнутая в процессе нагружения, u_i , σ_{ij} , s_{ij} , e_{ij} – компоненты

вектора скорости, тензора напряжений Коши и девиаторов тензоров напряжений и скоростей деформаций соответственно, p – давление, H – функция Хевисайда, D_J – производная Яумана, d/dt полная производная по времени, G – модуль сдвига, σ_T – предел текучести. По повторяющимся индексам производится суммирование. Параметр $\lambda = 0$ при упругом деформировании и $\lambda > 0$, если реализуется условие пластичности.

Замыкается система конечными соотношениями [5], определяющими динамическую сжимаемость и сопротивление сдвигу грунтовой среды

$$p = f_1(\rho, \ \rho_*)H(\rho_* - \rho)H(\rho_0 - \rho), \tag{11}$$

$$\sigma_T \equiv f_2(p),$$

где ρ_0 – начальная плотность.

Ударник считается недеформируемым, двигающимся как жесткое тело по нормали к свободной поверхности грунта. Осевая компонента вектора скорости и координата центра масс ударника определяются интегрированием уравнения движения ma = F(t), где a – ускорение, m – масса, F – сила сопротивления внедрению ударника. Величина F на каждом временном шаге расчетов вычисляется с учетом изменения во времени контактной поверхности в соответствии с контактным алгоритмом «непроницаемости» по нормали со «скольжением по касательной с сухим трением» [5, 43]

$$u_{s}' = u_{s}'', \ q_{s} = -q_{s}'', \ q_{s} = q'_{s} = \begin{cases} q_{s}, & |q_{s}| \le k |q_{\xi}| \\ k |q_{\xi}| \cdot sign(q_{s}), |q_{s}| > k |q_{\xi}| \end{cases}$$
(11)

где u_{α} , q_{α} – компоненты векторов скорости перемещений и контактного давления в местном координатном базисе ($\alpha = s, \xi$), s – направление касательной, ξ – нормали; k – коэффициент трения скольжения; знаки ' и '' обозначает соответствующие величины по разные стороны контакта. Применение условия (11) необходимо при расчете проникания сферического тела, для которого экспериментально показано наличие перехода застойной зоны в окрестности лобовой точки ударника к скольжению с образованием

кавитационной полости за счет срыва потока грунта. Система уравнений динамики грунтовой среды дополняется начальными и граничными условиями.

Численное моделирование проводится на основе модифицированного метода С.К.Годунова [1, 6] с учетом осевой симметрии в постановках, соответствующих натурным прямому и обращенному экспериментам. Функции f_1 и f_2 модели грунтовой среды С.С. Григоряна (5) принимаются в виде

$$f_{I}(\rho) \equiv \rho_{0} a^{2} \varepsilon / (1 - b \varepsilon)^{2}, \ \varepsilon \equiv 1 - \rho_{0} / \rho, f_{2}(p) \equiv \mu p / (1 + \mu p / \sigma_{M}),$$

что при значениях параметров $\rho_0 = 1.75$ г/см³, a = 450 м/с, b = 2.4, $\sigma_0 = 0$, $\mu = 1.14$, $\sigma_M = 0.275$ ГПа соответствует песчаной среде [6,28,94], коэффициент трения скольжения k=0.4-0.45. Объемная разгрузка грунтовых сред с достаточной для практических приложений точностью аппроксимируется линейной зависимостью от плотности, определяемой касательной к ударной адиабате в некоторой предельной точке $\rho_{\infty} = 2.5$ г/см³, модуль сдвига пропорционален разгрузочному модулю [4,61, 60].

Внешние границы расчетной области грунта считаются жесткими и соответствуют геометрии обоймы, используемой в натурном (прямом или обращенном) эксперименте. Область грунта разбивается разностной сеткой на квадратные ячейки с размером сторон R/n, R- радиус цилиндрической части ударника, n- число ячеек. Для анализа сходимости используемой модификации метода С.К.Годунова [1, 6] проводилась серия численных расчетов на сгущающихся сетках. Изменение квазистационарного значения силы в зависимости от размера ячейки R/n оказалось близко к линейному с достоверностью не менее 0.95, отличие значений сил при n = 80 от прогнозируемого при $n = \infty$ составило 2-3% [61].

Проведенные ранее расчеты процессов удара и проникания осесимметричных ударников в мягкие грунтовые среды [4,7,60] показали хорошее соответствие численных и экспериментальных результатов, что
свидетельствует о достоверности выбранной модели грунта [41] и эффективности применяемого математического и численного аппарата.

В численных расчетах в постановке, соответствующей прямому эксперименту, масса ударника принималась равной *m*=80 г, длина головной части ударника составляла10 мм. Скорости удара были соответственно *V*₀= 100, 150 и 200 м/с.



Рис.3.1. Результаты численных расчетов проникания жесткого ударника с полусферическим оголовком в сухой песок в прямой постановке.

На рис. 3.1 соответственно, расчетные приведены значения безразмерных сил сопротивления внедрению $C = 2F/(\rho V^2 S)$, где F - сила сопротивления, V - текущая скорость проникания, - площадь миделева безразмерного $(t/t_0).$ Ha сечения, В зависимости ОТ времени квазистационарной внедрения значения соответствуют стадии ЭТИ коэффициенту сопротивления C. Величина t_0 соответствует времени полного погружения головной части в грунтовую среду. По количественным оценкам, с ростом скорости удара время погружения головной части уменьшается со 100 мкс при 100 м/с до 33 мкс при 300 м/с. Расчеты проводились при скоростях удара 100, 150 и 200 м/с. Из рис. 3.1. видно, что длительность нестационарной стадии определяется временем погружения головной части ударника в песок т.е. $t_0 = R/V_0$, где R – радиус цилиндрической части ударника. Далее проникание переходит в квазистационарную фазу и характеризуется практически постоянным коэффициентом сопротивления C. Далее следует быстрый рост безразмерной силы сопротивления, связанный с приходом к ударнику волн, отраженных от стенок контейнера.

При внедрения с начальной скоростью 200 м/с искомый интервал внедрения $1 < t/t_0 < 8$ или 50-400 мкс. При ударе с начальной скоростью 150 м/с интервал времени, на котором коэффициент сопротивления *C* практически постоянен $1 < t/t_0 < 7$ или 65-450 мкс. А при скорости удара 100 м/с этот интервал равен $1 < t/t_0 < 5$ или 100 - 500 мкс. С ростом скорости влияние стенок контейнера на силу сопротивления начинает сказываться раньше - при скорости удара 100 м/с через 500 мкс, а при скорости 200 м/с через 400 мкс.

По результатам расчетов для всех экспериментов были определены временные интервалы, на которых коэффициент сопротивления внедрению практически постоянен, что исключает влияние, как нестационарной стадии внедрения, так и отраженных от стенок контейнера волн сжатия на результаты измерения. Таким образом, в исследуемом диапазоне скоростей соударения на измеряемые значения сил сопротивления, как на нестационарной так и на квазистационарной стадии влияние стенок контейнера практически не сказывается.

Темными маркерами на рис. 3.1 показаны значения *C*, рассчитанные на основе предлагаемой методики определения коэффициента сопротивления, которые хорошо соответствуют численным результатам.

3.1.3. Результаты прямых экспериментов

В Поскольку литературе практически отсутствуют данные 0 проникании полусферических ударников в сухой песок, то было проведено 40 более опытов прониканию цилиндрических по ударников С полусферическим оголовком [62]. B экспериментах регистрировались кинограммы проникания ударников в мишень из сухого песка. Затем по перемещению заднего торца строились зависимости глубины проникания от времени при скоростях внедрения ударников в сухой песок от 30 до 350 м/с. Определение глубины проникания с использованием скоростной съемки осуществлялось до того момента, когда выброшенный из мишени песок полностью перекрывал задний торец ударника. Падение скорости внедрения при этом составляло в каждом эксперименте 30÷40 % от её первоначального значения. Погрешность определения перемещения заднего торца ударника составляла $\Delta x^* = 0,15$ мм.

Внешний вид ударников после испытаний (рис.3.2) свидетельствует о том, что на носовой части ударников образуется связанный с ней слой раздробленных мелких частиц песка в виде конуса. Следует отметить, что этот слой тем толще (массивнее), чем выше скорость удара. По-видимому это связано с тем, что в процессе ударного взаимодействия происходит интенсивное разрушение частиц которое, песка. по-видимому, сопровождается существенным повышением температуры этих частиц, что приводит к их спеканию, компактированию и осаждению на поверхности полусферы. Аналогичное явление было обнаружено при проникании ударников с плоским торцем в работах [18,140]. Кроме того, в экспериментах не было обнаружено следов взаимодействия грунта с цилиндрической поверхностью ударника и примыкающей к ней частью полусферы, что свидетельствует 0 кавитационном характере процесса проникания. Последнее обстоятельство может приводить к изменению параметров закона проникания. Следует особо отметить, что присоединенная масса песка увеличивается с ростом скорости удара (рис.3.2).



Рис. 3.2. Головные части ударников после прямых экспериментов при скоростях удара(слева направо) 91, 144,147 и 271 м/с.

При обработке экспериментальных данных на основе зависимости глубины проникания от времени были получены значения коэффициента C, которые приведены в таблице 3.2 и на рис.3.3. В интервале скоростей от 30 до 140 м/с C уменьшается более чем в два раза (с 5 до 2), далее с ростом скорости до 300 м/с уменьшается менее чем в полтора раза, что позволяет говорить о наличии некоторой критической скорости [2,81], которая связана со сменой режима обтекания при скоростях удара близких V = 140 м/с. При малых скоростях внедрения (менее 130 м/с) происходит обтекание полусферы потоком частиц песка без их разрушения.

Как указывалось выше, с ростом скорости удара и ростом нагрузки увеличивается число разрушенных частиц, и происходит образование присоединенного конуса из измельченного песка (рис.3.2), после этого движение частиц происходит по поверхности присоединенного конуса из частиц песка, коэффициент трения которого выше коэффициента трения по металлу, что также может быть причиной изменения закона проникания.

Таблица 3.2

Условия проведения экспериментов

	Macca	Скорость	Коэффициент
№ эксп	ударника, г	удара, м/с	сопротивления, С _Х
210	80,5	223	1,81
211	79,5	222	2,1
212	79,5	147	2,38
213	79,5	147	2,9
214	79,5	147	2,16
215	79,5	145	3,05
216	79,5	150	2,13
217	79,5	146,5	2,57
218	79,5	150	2,74
219	79,5	146	2,03
220	79,5	157	2,02
221	79,5	151	1,89
222	79,5	144	2,14
223	79,5	212	2,43
224	79,5	215	1,74
225	79,5	216	1,75
226	79,5	271	1,7
227	79,5	270	1,59
228	79,5	261	1,73
229	80,3	121	2,8
230	80,3	115	2,57
231	80,3	102	3,1
232	80,3	91	3,5
233	80,3	91	2,93
234	80,3	73	3,96
236	80,3	60	4,21
237	80,2	85	2,87
238	80,2	81	3,35
239	80,2	36,5	5,22
240	80,2	86,4	2,99
241	80,2	82	3,49
242	80,2	74,5	3,16
243	80,2	67	3,42
244	80,2	64,8	3,89
245	95,75	206	1,8
246	95,7	248	1,73
247	95,6	241	2,04
248	95,6	299	1,73
249	95,6	324	1,84
250	59,85	336	1,36
251	59,8	339	1,52
252	59,8	255	1,62
253	59,8	153	2,46



Рис.3.3 Зависимость коэффициента сопротивления С от скорости удара V₀

3.1.4 Анализ погрешностей определения коэффициента сопротивления

Определение коэффициента сопротивления С проводилось из неявного выражения (3), в которое подставлялись значения x, t, ρ_0 , S, m, V_0 , полученные в экспериментах. Для оценки погрешности C_x возьмем частные производные от функции [8]

$$F = \frac{2m}{\rho_0 SC} \ln \left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1 \right) - x = 0$$

по всем аргументам. Используя уравнение для глубины проникания (3) и текущей скорости проникания (2) получаем

$$\frac{\partial F}{\partial m} = \frac{2}{\rho_0 SC} \ln\left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right) - \frac{V_0 t}{m\left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right)} = \frac{x}{m} - \frac{Vt}{m}$$
$$\frac{\partial F}{\partial \rho_0} = -\frac{2}{\rho_0^2 SC} \ln\left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right) + \frac{V_0 t}{\rho_0 \left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right)} = -\frac{x}{\rho_0} + \frac{Vt}{\rho_0}$$

$$\frac{\partial F}{\partial S} = -\frac{2}{\rho_0 S^2 C} \ln\left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right) + \frac{V_0 t}{S\left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right)} = -\frac{x}{S} + \frac{Vt}{S}$$

$$\frac{\partial F}{\partial C} = -\frac{2}{\rho_0 SC^2} \ln\left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right) + \frac{V_0 t}{C_x \left(\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1\right)} = -\frac{x}{C} + \frac{Vt}{C}$$

$$\frac{\partial F}{\partial V_0} = \frac{t}{\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1} = \frac{Vt}{V_0}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{V_0}{\frac{\rho_0 SC}{2m} V_0 t + 1} = V$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -1$$

Отсюда получаем соответствующие частные производные коэффициента сопротивления по всем аргументам



Относительные ошибки измерения *С*, вносимые погрешностями измеряемых величин, определяются из выражений

$$(\delta C)_{m} = \frac{C}{mC} \Delta m = \delta m$$

$$(\delta C)_{\rho} = \frac{C}{\rho_{0}C} \Delta \rho_{0} = \delta \rho_{0}$$

$$(\delta C)_{S} = \frac{C}{SC} \Delta S = \delta S$$

$$(\delta C)_{V_{0}} = \frac{VtC}{V_{0}(x - Vt)C} \Delta V_{0} = \delta V_{0} \frac{Vt}{x - Vt}$$

$$(\delta C)_{t} = \frac{VC}{(x - Vt)C} \Delta t = \delta t \frac{Vt}{x - Vt}$$

$$(\delta C)_{x} = \frac{C}{(x - Vt)C} \Delta x = \delta x \frac{x}{x - Vt}$$

Ошибки коэффициента сопротивления, измерения вызванные погрешностями определения массы и площади сечения ударника, плотности мишени, постоянны и равны соответствующим погрешностям измерения $\delta m=0.5\%$, площади сечения $\delta S=0.5\%$ и плотности $\delta \rho_0=1\%$. массы Относительные погрешности, вызванные неточностью измерения времени, глубины внедрения и скорости на момент начала интегрирования, не остаются постоянными и зависят от глубины внедрения и текущей скорости проникания. Можно оценить погрешности измерения при различных скоростях удара. Так как скорость в момент начала интегрирования определяется наклоном производной зависимости x(t) в начальной точке, погрешность определения скорости зависит от погрешности измерения перемещения на начальном участке Δx и величины интервала времени между кадрами. Так как погрешность измерения перемещения Δx в экспериментах составляла 0,15 мм, а величина интервала между кадрами 50 мкс, то абсолютная погрешность определения скорости ΔV_0 составляла 3 м/с. Погрешность измерения времени Δt определяется временем экспозиции каждого кадра и равна 0,1 мкс. В качестве текущей скорости внедрения V возьмем среднюю скорость проникания на временном интервале между 80 двумя последними кадрами кинорегистрации. Подставляя эти значения в формулы для соответствующих компонентов относительной погрешности определения коэффициента сопротивления получим, что при скоростях удара менее 100 м/с максимальная относительная погрешность δC_x составляет 25%. С ростом скорости удара до 300 м/с относительная погрешность уменьшается до 15%. Полученные значения максимальной относительной погрешность существенно, по крайней мере в два раза ниже, чем в работе [8].

3.1.5. Эксперименты с использованием акселерометрии

Как уже отмечалось, относительная погрешность определения коэффициента сопротивления в прямой постановке увеличивается с уменьшением скорости удара. Поэтому были проведены три эксперимента в прямой постановке с использованием пьезоакселерометров АП16 при низких скоростях удара (до 50 м/с) (таблица 3.3) [9]. При более высоких скоростях удара происходил обрыв провода, соединяющего акселерометр с регистрирующей аппаратурой.

На рис.3.4 приведены зависимости силы сопротивления и скорости проникания от времени для проведенных экспериментов. Скорость проникания определялась численным интегрированием зависимости замедления ударника от времени.

Хорошо видно, что сила сопротивления при скоростях удара 45,5 м/с и 48,6 м/с имеет ярко выраженный максимум при глубине внедрения 6-7 мм, далее следует плавный спад силы. При скорости удара 28 м/с максимум силы достигается при полном внедрении оголовка и далее в течение примерно 500 мкс сила практически постоянна.

На рисунке 3.5 приведены зависимости нормированной силы $C=2F/(\rho_0 V^2 S)$ от времени, где F-сила сопротивления, ρ_0 - начальная плотность песка, V - текущая скорость проникания, S - площадь миделева сечения. На квазистационарном участке внедрения нормированная сила соответствует коэффициенту сопротивления.



Рис. 3.4. Зависимости изменения силы сопротивления и скорости проникания от времени для экспериментов с акселерометрами

Таблица 3.3

			Максимальная	
			сила	Коэффициент
	Macca	Скорость	сопротивления,	сопротивления,
№ эксп	ударника, г	удара, м/с	кН	С
353	71,1	45,5	3,4	5
354	71,1	48,5	4	4
355	71,1	28	1,06	5,7

Условия проведения прямых экспериментов с акселерометрами

При скоростях удара 45,5м/с и 48,6 м/с зависимость нормированной силы имеет выраженный максимум, далее следует быстрый (за время ~ 120-130 мкс) спад и относительно ровный участок, соответствующий квазистационарному прониканию. Значения максимальной нормированной силы составляет 7,5 и примерно в 1,5 раза больше чем С. При скорости удара

 $V_0=28$ м/с нормированная сила имеет максимум 5,5 и затем практически постоянна. В момент времени 700-750 мкс после начала соударения максимальная нормированная сила начинает быстро расти, что по-видимому, связано с начавшимся влиянием волн, отраженных от стенок контейнера с грунтом.



Рис.3.5. Зависимости нормированной силы С от времени

Значения коэффициента сопротивления, полученные с использованием акселерометрии, отмечены на рисунке 3.3 крестиками. Видно, что эти данные совпадают полученными с co значениями, использованием высокоскоростной киносъёмки. Относительная погрешность данных акселерометрии высокоскоростной значительно меньше, чем для киносъёмки, и составляет 5 - 7%.

Также на рисунке 3.3 треугольными маркерами приведено значение C = 1,7 для стальной сферы, проникающей в сухой песок со скоростью 300 м/с, полученное в работе [89] с использованием интерферометра PDV. Это значение практически совпало с полученными в данной работе

экспериментальными результатами. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что предложенная методика определения C с использованием высокоскоростной цифровой киносъемки позволяет достоверно определять интегральные нагрузки при скоростях удара до 400 м/с.

Исходя из предложенного У. Алленом выражения

$$C = \alpha + \frac{\beta}{V} + \frac{\gamma}{V^2}$$

полученные зависимости по C(V) можно аппроксимировать с использованием метода наименьших квадратов. Однако полученное трехчленное выражение

$$C=0,895+209,7/V-2534/V^2$$

не имеет физического смысла т.к. один из его коэффициентов меньше 0.

Так как в зависимости C(V) имеется некая граничная скорость, разумно предположить, что два участка этой зависимости аппроксимируются по разному. При V>140 м/с имеет место зависимость вида $C=1,429+21120/V^2$, а при скорости V<140 м/с зависимость вида C=1,639+135,6/V. Данный вид зависимости соответствует характеру обтекания ударника потоком песка. Таким образом сила сопротивления на квазистационарном участке внедрения при скорости удара V_0 более 140 м/с выражается зависимостью

$$F_{\rm comp} = \alpha \rho_0 S V^2 / 2 + \gamma \rho_0 S / 2,$$

где ρ_0 - плотность песка, *S* - площадь основания полусферического оголовка ударника, $\alpha = 1,429$ и $\gamma = 21120$ м²/c².

В этом случае сила сопротивления внедрению включает скоростной напор, пропорциональный квадрату скорости проникания, и постоянный член, связанный с прочностью среды.

При скоростях удара V₀ меньше 140 м/с сила сопротивления на квазистационарном участке выражается зависимостью

$$F_{conp} = \alpha \rho_0 S V^2 / 2 + \beta \rho_0 S V / 2,$$

где ρ_0 - плотность песка, *S* - площадь основания полусферического оголовка ударника, $\alpha = 1,639$ и $\beta = 135,6$ м/с. В этом случае сила

сопротивления внедрению также включает скоростной напор, пропорциональный квадрату скорости проникания, и член, связанный с воздействием поверхностного трения, линейно зависящий от скорости.

3.2. Исследование проникания конических и полусферических оголовков в песчаный грунт различной влажности в обращенной постановке

Известно, что механические свойства грунтовых сред зависят от многих факторов (гранулометрического состава, влажности, плотности и т.д.). Например, в работах [94,125] показано, что сжимаемость и сдвиговые свойства песка зависят от влажности и эти зависимости имеют нелинейный характер. Естественно, что все это будет влиять на характеристики проникания твердых тел в песок, различной влажности. В работе [8] были определены силы сопротивления, действующие на полусферический ударник при внедрении в сухой и водонасыщенный песок. Эксперименты при других влажностях песка не проводились. К тому же не исследовалось проникание ударников другой формы (например, конических, плоского торца) в песок различной влажности. Поэтому данная часть работы посвящена изучению влияния влажности песчаной смеси на силы сопротивления при проникании конических и полусферических ударников, а также цилиндра с плоским торцем.

На установке ПГ-57 с использованием методики мерного стержня проводились обращенные эксперименты по определению зависимостей силы сопротивления от времени для цилиндрических ударников с оголовками различных форм в сухой, влажный (влажность 10%) и водонасыщенный (влажность 18-20%) песок. Исследования проводились с песком того же состава, что и в прямых экспериментах (плотность песка в сухом состоянии 1750 \pm 50 кг/м³ с размерами частиц 0,1-1 мм). Эксперименты проводились в диапазоне скоростей удара 50 – 400 м/с для ударников трех типов: плоского торца диаметром цилиндрической части 20мм, полусферы и конуса с углом

полураствора α = 30⁰. Диаметр основания всех ударников составлял 20 мм. Ударники и мерный стержень были изготовлены из высокопрочной стали с пределом текучести более 2000 МПа.

Метаемые контейнеры заполнялись сухим песком, который затем Контейнеры уплотнялся. для грунта были выполнены слегка ИЗ алюминиевого сплава Д16Т или полипропилена и представляли собой тонкостенный стакан (толщина стенки 1,3-1,4 мм для контейнера из алюминиевого сплава и 2,5 – 3 мм для контейнера из полипропилена) диаметром 56,8 мм с дном толщиной 2 мм, изготовленным из сплава Д16Т. Высота засыпки песком составляла 65 мм. Контейнеры взвешивались для определения плотности сухого песка, а затем заливались определенным количеством воды до достижения требуемой влажности. При влажности около 20% дальнейшее добавление воды вызывало образование слоя воды над поверхностью песка, поэтому лишняя вода сливалась. Для песка и выливания предотвращения высыпания воды сверху песок закрывался пленкой толщиной 0,05 мм. Контейнеры повторно взвешивались для определения плотности водонасыщенного песка и его влажности относительно его начальной плотности. Средняя плотность водонасыщенной естественной смеси составляла 2100 кг/м³, а песка с влажностью 10% 1920 кг/м³.

Условия проведения экспериментов с полусферой приведены в таблице 3.4. Характерные зависимости силы сопротивления от времени для проникания полусферы в сухой, влажный и водонасыщенный песок приведены на рис.3.6. Начальный участок проникания полусферических ударников в песчаную мишень характеризуется быстрым нарастанием силы сопротивления внедрению [8]. Как показали эксперименты, максимальные значения силы сопротивления, для разных скоростей удара, достигаются за время 25 – 50 мкс (с ростом скорости удара время достижения максимума уменьшается). Необходимо сухого отметить, что для песка свое максимальное значение сила сопротивления достигает при заглублении ударника на 5 – 6 мм, т.е. на 0,5 –0,6 радиуса. Далее, по-видимому, происходит отрыв потока от поверхности полусферы и образование вокруг ударника каверны, и в результате этого сила сопротивления при дальнейшем заглублении уменьшается до квазистационарного значения.



Рис.3.6. Зависимости силы сопротивления внедрению от времени для полусферы при различной влажности.

Данные настоящей полусферы работы ПО прониканию В водонасыщенный песок практически совпадают с полученными в работе [8]. Характерной особенностью полученных зависимостей "сила сопротивления время" для водонасыщенного песка является более короткое время нарастания силы сопротивления до максимума, чем при внедрении полусферического ударника в сухой песок. Максимум силы сопротивления наступает примерно в два раза быстрее (за 15 мкс при скорости удара около 300 м/с и за 30 мкс при скорости удара 150 м/с), чем при внедрении полусферического ударника в сухой песок и достигается при глубине внедрения 3 – 4 мм. Интенсивное нарастание силы сопротивления внедрению связано, скорее всего, с меньшей сжимаемостью водонасыщенного песка. Время спадания нагрузки также меньше, чем при внедрении в сухой песок, что в свою очередь связано с большей скоростью разгрузки в водонасыщенном песке. При скорости удара 374 м/с время спада составляет 20 мкс, а при скорости 117 м/с - 35 мкс.

Проведенные расчеты проникания полусферы в водонасыщенный песок в обращенной постановке с использованиемпакета программ "Динамика-2" [66] показывают, что головная волна сжатия начинает отражаться от боковой стенки контейнера и взаимодействовать с волной разрежения, исходящей от свободной поверхности, в момент времени, когда максимальные значения силы сопротивления уже пройдены без существенного влияния на них отраженных от боковых стенок волновых возмущений. Отражение головной волны сжатия от дна контейнера происходит на более поздних стадиях рассматриваемого процесса.

На рис 3.7 изображена расчетная область задачи в характерные моменты времени 70 и 146 мкс после начала соударения со скоростью 250 м/с. Здесь сгущение изолиний давления вблизи головной части тела вызвано максимальная его высоким градиентом, a степень черноты фона соответствует его максимальному уровню. Видно, что лишь к моменту времени 70 мкс головная волна сжатия начинает отражаться от боковой стенки контейнера и взаимодействовать с волной разрежения, исходящей от свободной поверхности. Отражение головной волны сжатия от днища контейнера происходит на более поздних стадиях рассматриваемого процесса при временах, превышающих 140 мкс.

Для песка с влажностью 10% характер изменения силы сопротивления во времени при проникании полусферы и её максимальное значение близки к аналогичным характеристикам для сухого песка. На рис.3.8. приведены зависимости максимальной силы сопротивления от скорости для полусферы при внедрении в песок различной влажности. Можно отметить, что максимальные силы сопротивления в исследованном диапазоне скоростей удара для песка с влажностью 0% и 10% практически совпадают. Для водонасыщенного песка максимальная сила примерно в 1,5 – 2 раза ниже,

чем для сухого, что, по-видимому, связано со значительным уменьшением сил трения для водонасыщенного песка.



Рис.3.7. Расчетная область задачи в характерные моменты времени 70 (слева) и 146 мкс (справа) при ударе полусферического оголовка в водонасыщенный песок со скоростью 250 м/с .



Рис.3.8. Зависимости максимальной силы сопротивления от скорости удара для полусферы

В работе [8] было экспериментально определено, что влияние стенок контейнера на результаты измерения максимальной силы сопротивления внедрению конических ударников минимальны для конусов с углом конусности $2\alpha \ge 60^{\circ}$, поэтому для исследований был выбран конус $2\alpha = 60^{\circ}$ с диаметром основания 19,8 мм и высотой 17 мм. Условия проведения экспериментов приведены в таблице 3.5.

Характерные зависимости силы сопротивления прониканию конического оголовка в песок различной влажности приведены на рис.3.9. Здесь можно отметить следующие общие моменты: нарастание силы сопротивления после начала соударения имеет параболический характер, максимум силы сопротивления достигается при внедрении всей конической части оголовка или сразу после этого момента.

Таблица 3.4. Условия проведения экспериментов по прониканию полусферического ударника в сухой, влажный и водонасыщенный песок

№ экспе-		Скорость	
римента	Влажность,%	удара, м/с	Fmax,кН
400	19	106	8,75
401	19	117	12
402	19	210	23,87
403	19	262	36,5
404	19	250	31
405	19	315	47,5
406	19	282	40
407	19	374	57,2
408	0	377	100
409	10	199	40,3
410	10	239	55
411	10	73	12
412	10	104	19,3
413	10	90	13
414	10	250	60
415	0	214	42,5
416	0	132	22,5
437	0	401	141

Для сухого песка и песка с влажностью 10% зависимости силы сопротивления от времени до полного погружения конуса в песок совпадают. Отличия после этого момента отражают влияние стенок контейнера и, вероятно, связаны с тем, что использовались два разных типа контейнера: для сухого песка использовался контейнер из алюминиевого сплава, а для песка влажностью 10% - контейнер из полипропилена. Для водонасыщенного песка

максимальная сила сопротивления примерно в 1,5 раза ниже, чем для сухого песка и песка с влажностью 10%.

№ экспе-		Скорость	
римента	Влажность,%	удара, м/с	Fmax,кН
417	10	223	33,7
418	10	224	31,3
419	10	242	37
420	10	341	60,5
421	10	331	57,5
422	20	234	26,5
423	20	315	35
424	20	323	35
425	20	240	26
426	20	210	20
427	20	118	14,5
428	20	98	10
429	20	90	11
430	20	120	10
431	20	106	8,8
432	20	272	27
433	20	278	30
434	20	275	26
435	20	396	46,7

Таблица 3.5. Условия проведения экспериментов по прониканию конического оголовка во влажный и водонасыщенный песок.

На рис.3.10. приведены зависимости максимальной силы сопротивления от скорости удара при внедрении конуса в песок различной влажности. Видно, что максимальная сила сопротивления для конуса при

внедрении в песок влажностью 0% и 10% практически одинакова, а при проникания в водонасыщенный песок её значения лежат значительно ниже, чем для сухого песка и песка влажностью 10% (так же как для полусферы в 1,5 – 2 раза).



Рис.3.9. Зависимости силы сопротивления внедрению от времени для конуса при скоростях удара 240 -250 м/с

Для качественного объяснения полученных результатов следует обратиться к динамическим свойствам песка различной влажности. На рис.3.11 приведены кривые сжимаемости, полученные на установке с разрезным стержнем Гопкинсона при различных влажностях песка от 0 до 25% (водонасыщенный песок) [94]. Хорошо видно, что между зависимостями "давление - объемная деформация" для сухого песка и для песка 10% влажности нет существенных отличий. Скорости разгрузки, определяемые наклоном разгрузочной ветви диаграммы деформирования, для этих песков также близки. Влажность начинает оказывать значительное влияние на динамические свойства, при ее увеличении свыше 10%. Так как в экспериментах по методу РСГ исследовался диапазон относительно низких давлений до 500МПа, можно обратиться к результатам экспериментов по определению ударной сжимаемости песка различной влажности при более высоких значениях давлений, полученных в плосковолновом ударном эксперименте (рис.3.12) [28, 99]. Хорошо видно, что экспериментальные точки, соответствующие сухому песку и песку с влажностью 11% процентов близки. Поэтому можно утверждать, что в исследуемом диапазоне скоростей удара от 100 до 400 м/с максимальные силы сопротивления в сухой и влажный (10%) песок для конического ударника будут близки, что и наблюдается в проведенных эксперимнтах. Для полусферического ударника, максимальная сила сопротивления для сухого песка и песка влажностью 10% также близки. В тоже время ударная адиабата водонасыщенного песка лежит значительно выше, чем ударная адиабата сухого.



Рис.3.10. Зависимость максимальной силы сопротивления внедрению конуса от скорости удара

Нельзя не отметить и тот факт, что сдвиговые свойства сухого и влажного песка (10% влажность) также практически одинаковы рис.3.10. Для водонасыщенного песка (влажность 20%) сдвиговая прочность и трение на поверхности ударника значительно меньше, чем для сухого, и влажного (10%) песка, что приводит к уменьшению максимальной силы сопротивления для конуса.



Рис.3.11. Кривые сжимаемости песка различной влажности

Экспериментально показано [8], что с одной стороны, время достижения максимума для водонасыщенного песка существенно меньше (т.е. при меньшем заглублении), чем для сухого при одинаковых скоростях удара. И поэтому, несмотря на существенное уменьшение сжимаемости водонасыщенного песка, максимальная сила сопротивления внедрению полусферы значительно меньше, чем при внедрении в сухой песок, что, повидимому, связано со значительным уменьшением сил трения,т.к. вода может играть роль смазки.



Рис.3.12. Сопротивление сдвигу для песка различной влажности



Рис.3.13. Ударные адиабаты песка различной влажности

3.3 Проникание цилиндрического ударника с плоским торцем в

песчаный грунт различной влажности

В работе [8] проведено исследование проникания цилиндра с плоским торцем В сухой песок В обращенном эксперименте. Определены максимальная сила сопротивления внедрению и коэффициент сопротивления квазистационарном участке. По максимуму силы сопротивления на определены параметры ударной адиабаты для сухого песка [28]. Однако исследование влияния физико-механических свойств песка различной влажности на силы сопротивления внедрению проведено не было. В связи с результаты ЭТИМ В данном разделе приведены экспериментального исследования ударного взаимодействия цилиндра с плоским торцем с влажным (влажность 10%) и водонасыщенным (влажность ~ 20%) песком. Плотность сухого песка составляла 1750 кг/м³, влажного - 1920 кг/м³, водонасыщенного 2100 кг/м³. Всего было проведено 10 экспериментов (1 с сухим песком, 3 с влажным и 6 с водонасыщенным). Условия проведения экспериментов приведены в таблице 3.6.

Ha рис.3.14-3.16 сравнение приведено зависимостей силы сопротивления, определенных по деформации на поверхности стержня для различных скоростей удара в песок различной влажности. Результаты для сухого песка при скоростях удара взяты из работы [8]. Можно сделать вывод, что и по форме и по амплитуде зависимости силы для сухого песка и песка с влажностью 10% близки. На зависимостях (рис. 3.14, 3.15, 3.16) для сухого и влажного (10% песка) видны признаки дисперсии волн в стержне, которые выражаются в виде колебаний на хвостовой части импульса силы, однако амплитуда наложенных колебаний не превышает 0,1 от максимальной величины силы. Из представленных рисунков хорошо видно, что для водонасыщенного песка импульс силы, зарегистрированный в стержне сопровождается сильной дисперсией. Амплитуда наложенных колебаний на хвостовой части сравнима с максимумом импульса.

Таблица 3.6. Условия проведения экспериментов по прониканию

№ экспе-		Скорость	
римента	Влажность,%	удара, м/с	Fmax,кН
554	10	129	52
555	10	326	227
556	10	199	106
557	20	126	61
558	20	167	75
559	20	337	185
560	20	350	220
561	20	192	102
562	0	182	90
563	20	342	196

ударников с плоским торцем

На рис. 3.17 и 3.18 приведено сравнение импульсов зарегистрированных в стержне на расстоянии 500 и 1000 мм от ударяемого торца для сухого и водонасыщенного песка. Видно, что для сухого песка импульс сжатия при распространении по стержню практически не изменяется. Максимумы силы на различных расстояниях от плоскости соударения отличаются(500 и 1000 мм) не более чем на 3%.

Для водонасыщенного песка амплитуда импульса изменяется более чем на 15% при распространении от сечения 500 мм до сечения 1000 мм. Это свидетельствует 0 сильной дисперсии импульса силы при его распространении в стержне при ударе по водонасыщенному грунту. Поэтому водонасыщенного песка сила сопротивления, рассчитанная ДЛЯ ПО показаниям датчиков, удаленных от плоскости соударения на значительное расстояние, будет определятся с большой погрешностью. Для плоского торца при внедрении его в сухой песок и влажный (10%) значения максимальной силы сопротивления так же как и для полусферы и конуса (см. предыдущий раздел) практически не отличаются друг от друга.



Рис.3.14. Зависимости силы сопротивления внедрению от времени для плоского торца при скоростях удара 120-130 м/с



Рис.3.15. Зависимости силы сопротивления внедрению от времени для плоского торца при скоростях удара 180-200 м/с



Рис.3.16. Зависимости силы сопротивления внедрению от времени для плоского торца при скоростях удара 320-330 м/с



Рис.3.17. Сравнение импульса в мерном стержне на различных расстояниях от ударяемого конца при проникании плоского торца в сухой песок при скорости удара 182 м/с (№562)



Рис.3.18. Сравнение импульса в мерном стержне на различных расстояниях от ударяемого конца при проникании плоского торца в водонасыщенный песок при скорости удара 192 м/с (№561)

В работах [28] предложен способ определения параметров ударной адиабаты по результатам обращенных экспериментов с плоским торцем. Данный метод прост в исполнении, не требует использования большого количества датчиков давления, хотя имеет ограничения по напряжениям, связанные с прочностью стержня ~ 2ГПа. Очевидно, что для водонасыщенного грунта этот метод не может быть использован из-за большой погрешности, вызванной сильной дисперсией распространяющегося в стержне импульса.

Из полученных результатов видно, что длительность импульса силы для водонасыщенного песка значительно меньше длительности импульса в случае сухого и влажного песка. Источник погрешности связан с искажением амплитуды как формы так И импульса за счет дисперсии при распространении его в мерном стержне, что исследовалось еще Г. Кольским [57], Р. Дейвисом [46] и другими авторами. При ударе по водонасыщенному песку длительность нестационарной стадии уменьшается по сравнению с

сухим песком, что по видимому, связано с ростом крутизны фронтов импульса за счет роста скорости распространения волн нагрузки и разгрузки с ростом давления. Как следствие в спектре импульса появляются компоненты с длиной волны меньше десяти радиусов стержня, которые подвержены сильной дисперсии. Это приводит к появлению на заднем фронте импульса высокочастотных колебаний значительной амплитуды, возможному изменению длительности и амплитуды импульса.

При разложении в спектр временной зависимости силы, действующей на стержень, ширина спектра будет определятся длительностью нестационарной стадии внедрения. Так как длительность импульса силы τ , действующей на нестационарном участке внедрения согласно расчетам соответствует 5мкс, то ширина спектра подобного сигнала составляет 200кГц. Для такой частоты длина волны $\lambda = c\tau$ (где *c*-скорость звука) составит не более 25мм, что только в 2 раза больше радиуса стержня, а это явно сильно нарушает критерий отсутствия дисперсии [46,57] $\lambda/r \geq 10$, где *r* - радиус мерного стержня, λ - длина волны.

Для коррекции формы импульса разработаны методики, которые в экспериментах с использованием системы разрезных стержней Гопкинсона [33,58,80,83,106,111,113,114,118], позволяют вычислить поправки на дисперсию. Эти методики основаны на точном решении Похгаммера-Кри для бесконечного упругого цилиндра и применении прямого и обратного преобразований Фурье.

В эксперименте импульс деформаций на поверхности мерного стержня может быть представлен в дискретном виде набором точек $e_n = e(t_n)$, $t_n = n\Delta t$, $n = \overline{0, N-1}$, где Δt - шаг дискретизации. Дискретное преобразование Фурье записывается следующим образом

$$e_n = \sum_{k=0}^{N/2} C_k \cos \frac{2\pi k (n + \varphi_k)}{N},$$

где C_k и φ_k , k = 0, K, N/2 - амплитуды и фазы гармоник ряда Фурье.

Влияние дисперсии учитывается [33,58,80,106,113,114] сдвигом по фазе на величину $\Delta \varphi$ в каждой гармонике

$$\widetilde{e}_n = \sum_{k=0}^{N/2} C_k \cos \frac{2\pi k (n + \widetilde{\varphi}_k)}{N},$$
$$\widetilde{\varphi}_k = \varphi_k + \Delta \varphi_k, \ \Delta \varphi_k = \omega_k z_0 \left(\frac{1}{c_0} - \frac{1}{c(\omega_k)}\right), \ \omega_k = \frac{2\pi k (N-1)}{N\Delta t}.$$

Значения $c(\omega)$ определяются из решений дисперсионного уравнения

[57], связывающего фазовую скорость $c = \frac{\omega}{s}$ и длину волны $l = \frac{2\pi}{s}$

$$4Gs^{2} \left[\frac{\partial J_{1}(\kappa r)}{\partial r}\right]_{r=a} \left[\frac{\partial J_{0}(hr)}{\partial r}\right]_{r=a} - \left\{2G \left[\frac{\partial^{2} J_{0}(hr)}{\partial r^{2}}\right]_{r=a} - \frac{\omega^{2} \rho \lambda}{\lambda + 2G} J_{0}(ha)\right\} \left(2s^{2} - \frac{\omega^{2} \rho}{G}\right) J_{1}(\kappa a) = 0$$

Здесь *s* – волновое число, $\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ - параметр Ламэ,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$
 - модуль сдвига, $h = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_e^2} - s^2}$, $\kappa = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_s^2} - s^2}$, $c_e = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$,
 $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ - скорости продольной и сдвиговой волны, J_0 , J_1 - функции

Бесселя.

Значения силы сопротивления рассчитываются по модифицированным формулам

$$F = E\tilde{e}_n S_0 = ES_0 \sum_{k=0}^{N/2} C_k \cos \frac{2\pi k \left(n + \tilde{\varphi}_k\right)}{N}$$
(3)

Известны также модификации методики восстановления импульса, основанные на точном решении Р. Дейвиса задачи о распространении продольной гармонической волны в упругом круговом цилиндре с учетом неравномерности распределения деформаций вдоль поперечного сечения 103 стержня [127,135,136]. В этом случае корректируются также коэффициенты разложения *C*_{*k*}

$$F^{II} = S_0 \sum_{k=0}^{N/2} M_2 \tilde{C}_k \cos \frac{2\pi k (n + \tilde{\varphi}_k)}{N}$$
(4)
$$\tilde{C}_k = M_1 C_k, \ M_1 = \frac{2 \left(1 + \frac{1 - SZ}{Z - 1}\right)}{\frac{\eta a J_0(\eta a)}{J_1(\eta a)} + \frac{(1 - SZ)}{(Z - 1)} \frac{\chi a J_0(\chi a)}{J_1(\chi a)}}, \ S = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu},$$

$$, \ Z = \left(1 + \nu \right) \left(\frac{c(\omega)}{c_0}\right)^2, \ \eta = s\sqrt{SZ - 1}, \ \chi = s\sqrt{2Z - 1},$$

$$M_2 = E \left(\frac{c(\omega)}{c_0}\right)^2.$$

Умножение каждой гармоники ряда на множитель M_1 преобразует деформацию на поверхности мерного стержня в среднюю по поперечному сечению деформацию, введение множителя M_2 позволяет рассчитать среднее напряжение [136].

Процесс распространения короткого импульса сжатия, образующегося при ударе о торец мерного стержня водонасыщенного и сухого песка был исследован нами численно [63]. Целью исследования является анализ погрешности определения усилия, действующего на ударник, рассчитанного по значениям импульса деформации, измеряемого на поверхности мерного стержня на значительном расстоянии от плоскости удара.. Параметры мерного стержня следующие: радиус *a*=0,01025 м, модуль Юнга *E*=186 ГПа, коэффициент Пуассона *v* =0,3, плотность ρ =8050 кг/м³, предел текучести 2 ГПа.

На рис. 3.19 представлены зависимости от времени деформации на поверхности мерного стержня в окрестности ударяемого торца (кривая *1*), на расстоянии 1 м от его торца (кривая *2*), кривая *3* соответствует решению, «восстановленному» по формуле (4) (см. также [127,135,136]).



Рис.3.21. Зависимости деформации на поверхности мерного стержня от времени при ударе контейнером с водонасыщенным песком (в окрестности ударяемого торца (кривая 1), на расстоянии 1 м от его торца (кривая 2), кривая 3 соответствует "восстановленному" импульсу)

Исходный импульс деформации, обозначенный кривой *1* на рис. 3.19, получен численно при ударном взаимодействии стержня с контейнером, заполненным водонасыщенным грунтом при скорости удара 400 м/с. Отметим более чем двукратное уменьшение амплитуды импульса *2* при распространении его на расстояние 1 м от торца, ошибка в определении амплитуды импульса *3* после коррекции составляет около 60%. Как видно из расчетов, график силы на квазистационарном участке имеет колебательный характер, однако после 20 мкс среднее значение силы соответствует значению силы, вычисленному на торце мерного стержня.

На рис. 3.20 представлены аналогичные результаты, соответствующие расчету процесса взаимодействия сухого песчаного грунта с мерным стержнем (обозначения, как на рис. 3.19). Отметим наличие колебаний в

импульсе 2, существенно уменьшившихся после корректировки по формуле (4), и практическое отсутствие ошибки как в определении максимальной амплитуды импульса, так и его квазистационарного значения.



Рис.3.20. Зависимости деформации на поверхности мерного стержня от времени при ударе контейнером с сухим песком (в окрестности ударяемого торца (кривая 1), на расстоянии 1 м от его торца (кривая 2), кривая 3 соответствует "восстановленному" импульсу)

Проанализируем распределение деформаций ВДОЛЬ поперечного сечения мерного стержня. На рис. 3.21 в полулогарифмических координатах представлены амплитудные спектры распространяющихся импульсов Кривая соответствует точному решению деформаций. 1 (заданному граничному условию на торце стержня), кривые 2, 3 представляют спектры импульсов деформаций на оси симметрии и на поверхности стержня, кривая 4 – спектр импульса после корректировки по формуле (4), соответствует среднему по сечению значению. Можно отметить близость кривых 1 и 4 до значений частоты 140 кГц, после которого наблюдается расхождение кривых. Это расхождение и приводит к ошибкам в восстановлении значения силы сопротивления внедрению в водонасыщенный грунт.

Спектры импульсов деформаций для сухого песка показаны на рис. 3.22 (обозначения осей и кривых также, как на рис. 3.21). Наблюдается качественно подобная картина с обращением в нуль амплитуды импульса продольных деформаций на оси симметрии стержня при значении частоты 140 кГц, однако амплитуды гармоник, соответствующих более высоким частотам более чем на два порядка меньше по величине, что не приводит к существенным ошибкам. Значение частоты 140 кГц является критическим, так как при этом значении в формулах (4) обращается в ноль знаменатель коэффициента M_1 .



На рис. 3.23 приведена относительная ошибка в определении максимального значения силы сопротивления внедрению в зависимости от длительности нестационарной стадии импульса на торце мерного стержня.

Кривая *1* соответствует импульсу деформаций на поверхности мерного стержня на расстоянии 1 м от торца, кривая *2* получена с поправкой на дисперсию по формуле (3), кривая *3* – с дополнительным учетом неравномерности распределения деформаций по сечению стержня по формуле (4).



Рис. 3.23

По результатам численных расчетов получено, что длительность нестационарной стадии импульса сжатия в полностью водонасыщенном грунте не превышает 5-6 мкс, в сухом песке – около 15 мкс. Таким образом, ошибка в определении максимума силы сопротивления внедрению пропорциональна влажности и для водонасыщенного грунта составляет не менее 60% (рис. 3.23).

Полученное значение частоты 140 кГц является критическим для выбранного значения радиуса стержня *а*=0.01025 м и коэффициента Пуассона *v* =0.3. Данное значение критической частоты может быть увеличено за счет применения стержня меньшего радиуса, однако техническая реализация подобного варианта методики обращенного эксперимента может столкнуться с новыми трудностями, связанными с необходимостью достаточной представительности отношения диаметра стержня к размеру частиц песка, обеспечения продольной устойчивости стержня и т.д. Следует отметить, что квазистационарное значение силы сопротивления внедрению после введения поправок на дисперсию определяется с приемлемой погрешностью не превышающей 10%.

На рис.3.24 приведены значения коэффициента сопротивления С на квазистационарном участке внедрения для водонасыщенного песка,
полученные в обращенных экспериментах. Для сравнения там же приведены данные Коллинза и Сиераковского [101], полученные в прямых экспериментах. Кривая, аппроксимирующая зависимость С от скорости удара, построена по результатам [101]. Видно, что результаты, полученные в этой работе близки к результатам, полученным в диссертационной работе, что подтверждает достоверность определения С.



Рис.3.24. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости удара для водонасыщенного песка

3.4.Экспериментальное исследование удара и проникания конических ударников в мерзлый песок в обращенной постановке

Известно, что большое внимание сейчас уделяется проблемам Арктики, развитию ее гражданской и военной инфраструктуры, добыче там полезных ископаемых. Поэтому в настоящее время существует большая потребность в изучении физико-механических свойств грунтовых сред при отрицательных температурах и интенсивных воздействиях ударного или взрывного характера.

Существующие программные комплексы позволяют проводить расчеты ударного взаимодействия конструкций с грунтовыми средам в замороженном состоянии при наличие адекватных моделей мерзлых грунтов, описывающих их деформацию и разрушение в широком диапазоне изменения нагрузок, скоростей деформаций в том числе и при пониженных температурах. Для определения параметров таких моделей требуется проведение обширного круга исследований механических свойств грунтов в диапазоне нагрузок до 10 ГПа и скоростей деформации в диапазоне $10^2 - 10^5$ c⁻¹.

Кроме того для верификации полученных расчетных результатов и моделей грунтовых сред при низких температурах требуется проведение модельных и натурных экспериментов по прониканию тел различной формы в мерзлый грунт. Можно отметить, что в настоящее время, по крайней мере в открытой литературе, практически отсутствуют данные о проникании твердых и деформируемых тел в грунтовые среды и конструкции при отрицательных температурах.

Исследование закономерностей контактного взаимодействия жестких и деформируемых ударников с мерзлыми грунтами имеет важное научное и прикладное значение. В этой связи особая роль отводится лабораторным экспериментальным исследованиям деформирования мерзлого грунта при варьировании параметров состояния грунта, скорости деформации и температуры.

Поведение мерзлого песка при давлениях, не превышающих 20 МПа и 10^{-2} с⁻¹, достаточно подробно леформаций ЛО скоростях изучено В экспериментах на одноосное и трехосное сжатие [116,119,133,144]. Более высокие скорости деформаций порядка 10² - 10³ с⁻¹ реализованы в экспериментах с применением системы разрезных стержней Гопкинсона [56,130], в которых получены диаграммы деформирования мерзлого песка при температуре до -28°C. Данные экспериментов используются для оснащения математических моделей упругопластического поведения мерзлого грунта с различными аппроксимациями поверхностей текучести и разрушения [56,116,119,130,144]. Более сложные модели явно учитывают зависимость от температуры [143] или влияние не полностью замерзшей воды [120,141]. Упругие свойства мерзлого песка определялись в работах [97,121,129], по измерениям скоростей распространения волн сжатия и сдвига. Получено, что в водонасыщенном мерзлом грунте при температуре менее -10°С скорость продольной волны может составлять 3-4 км/с.

Однако результаты ударных экспериментов с мерзлым грунтом, быть использованы численной верификации которые могут для математических моделей, В открытой литературе представлены недостаточно. В данном разделе приводятся новые результаты обращенных экспериментов, в ходе которых определены зависимости максимальных значений силы сопротивления внедрению конического ударника в мерзлый песок различной исходной влажности при скоростях удара от 100 до 400 м/с.

3.4.1 Условия проведения экспериментов с мерзлым грунтом

Эксперименты проводились с песчаной смесью естественного состава аналогичной по составу песку, результаты исследований которого приведены в предыдущих разделах. В экспериментах использовались контейнеры из сплава Д16Т и полипропилена. Контейнеры из сплава Д16Т имели внешний диаметр 56,8 мм, толщину стенки 1,4 мм и толщину дна 2 мм, а контейнеры из полипропилена имели внешний диаметр 56,8 мм толщину стенки 3 мм и дно из Д16Т толщиной 2 мм.

Метаемые контейнеры заполнялись сухим песком, который затем 1750 кг/м³. до средней плотности близкой Контейнеры уплотнялся взвешивались для определения массы и плотности сухого песка, а затем постепенно заливались водой до полного насыщения песка. Дальнейшее добавление воды вызывало образование слоя воды над поверхностью песка, поэтому лишняя вода удалялась. Контейнеры повторно взвешивались для определения плотности водонасыщенного песка И его влажности относительно его начальной плотности. Средняя плотность водонасыщенной естественной смеси составляла соответственно 2090 кг/м³. Так как песок в основном состоит из частиц кварца, плотность которого 2650 кг/м³, таким образом, пористость песка составляет 0.34. При полном заполнении этих пустот водой плотность влажного песка должна возрасти на величину 340 кг/м³, и плотность водонасыщенного песка должна быть равна 2090 кг/м³, что практически имело место при подготовке экспериментов. Влажность водонасыщенного составляла 18-19%. Затем контейнер песка с $-18^{\circ}C$ водонасыщенным грунтом замораживался при температуре И выдерживался в морозильной камере не менее 2 суток.

При замораживании часть воды вытеснялась из песка, а на поверхности песка выше краёв контейнера образовывался выпуклый слой льда, который удалялся перед экспериментом. После этого контейнер взвешивался для определения плотности замороженного песка. Средняя плотность мерзлого песка составляла 2050 кг/м³.

Для определения сил сопротивления, действующих на ударники при внедрении мёрзлый В песок применялась методика обращенного эксперимента с использованием мерного стержня. В экспериментах использовались конические ударники с углом раствора конуса $2\alpha = 60^{\circ}$. Ударники помощью соединялись с мерным стержнем С резьбы. Использовались два вида ударников с диаметром основания 19,8 мм и 10 мм (рис.3.25). Головные были части ударников изготовлены ИЗ стали

03H18K9M5T. Кроме того для оценки влияния на результаты экспериментов резьбового соединения и стыков между ударником и стержнем использовался сплошной мерный стержень диаметром 12 мм, изготовленный из стали 30XГСА с пределом текучести 700 МПа. Ударяемый конец мерного данного стержня был изготовлен ввиде конуса с углом $2\alpha = 60^{\circ}$. Условия проведения экспериментов приведены в таблицах 3.7-3.11



Рис.3.25. Оголовки, использованные в исследовании проникания в мерзлый песок(сверху ударник с диаметром основания 19,8 мм, снизу 10 мм)

3.4.2. Результаты экспериментального исследования проникания

конических ударников в мерзлый песок

Эксперименты проводились в диапазоне скоростей до 400 м/с. Всего проведено более 100 опытов с коническими оголовками с углом полураствора конуса $\alpha = 30^{\circ}$ с различными диаметрами основания (10, 12 и 20 мм) [30]. Примеры полученных зависимостей силы сопротивления от времени для различных скоростей удара приведены на рис.3.26,3,27. На всех диаграммах видно, что начальные участки зависимостей до некоторого значения силы сопротивления С от времени для конусов с различными основаниями практически совпадают. Максимумы силы достигаются при временах полного погружения конической головной части. На зависимостях силы от времени не выявлено признаков, свидетельствующих о влиянии стыков на форму импульсов

При скоростях удара порядка 130 м/с .(рис.3.26) для конуса с основанием 10 мм после достижения первого максимума следует уменьшение силы на 20% в точке 20мкс до некоторого почти постоянного уровня (в течение 30 мкс), далее следует плавное нарастание силы в течении 90 мкс. После этого следует резкий подъем силы, связанный с началом взаимодействия грунта с конической частью диаметром 20 мм. Для конуса с основанием 12 мм сразу за достижением максимума следует плавное нарастание силы на 25% до практически постоянного значения, что по всей видимости связано с воздействием стенок контейнера (через 90 мкс после начала соударения). Для ударника с основанием 20 мм в течение 90 мкс после начала соударения нарастание силы сопротивления идет по параболическому закону. Далее на фронте импульса наблюдается уменьшение наклона кривой. В данном случае вероятно это связано с влиянием волн разгрузки, приходящих от границ контейнера из-за его податливости(его деформации и возможно даже разрушения). Максимум силы достигается немного позже ожидаемого (порядка 67 мкс для 10 мм ударника, 80 мкс для 12 мм, и 133 мкс для 20 мм ударника) времени полного

погружения конической головной части, что может быть связано с торможением образца мерзлого грунта в процессе взаимодействия с ударником. Значения максимальной силы для конуса диаметром 20 мм превышает значение максимальной силы для конуса с диаметром 10 мм примерно в три раза, что меньше ожидаемого из соотношений площадей миделева сечения (4:1). Данный факт можно объяснить разнонаправленным влиянием стенок контейнера (разгрузка для 20 мм конуса за счет деформации и разрушения контейнера и дополнительная нагрузка для конуса 10мм.).

N⁰	№ эксп	V,м/с	Fmax, кН	C
1	441	120	22,5	4,7
2	442	135	23	3,8
3	443	197	25	1,95
4	444	263	48,6	2,1
5	445	273	52,6	2,1
6	476	315	52	1,58
7	575	150	22,5	3,0
8	577	162	26	3,0
9	580	192	30	2,46
10	581	133	25	4,28
11	587	163	25	2,85
12	588	230	30,5	1,7
13	589	240	41,5	2,18
14	590	226	36	2,1
15	591	242	43	2,2
16	603	201	37	2,77
17	624	339	60	1,58
18	625	317	53	1,6
19	626	290	48	1,7
20	627	346	53,5	1,35
21	631	382	60	1,25

Таблица 3.7. Условия проведения экспериментов с мерзлым водонасыщенных	M
песком. Диаметр основания конуса 20 мм	

Таблица 3.8. Условия проведения экспериментов с мерзлым водонасыщенным

N⁰	№ эксп	V ₀ ,м/с	Fmax, кН	С
1	447	131	7,5	5,3
2	448	254	8	1,5
3	449	211	12,5	3,4
4	478	69	5,7	14,5
5	479	125	11	8,5
6	481	356	18,1	1,7
7	582	147	13	7,29
8	583	124	11	8,67
9	585	143	11	6,5
10	586	147	9,1	5,1
11	593	224	13,6	3,28
12	596	171	12,2	5,06
13	597	219	11,4	2,88
14	598	152	11,4	6
15	599	173	11,4	4,6
16	600	209	14	3,88
17	601	245	14	2,8
18	602	157	12	5,9
19	604	160	13	6,1
20	605	88	8,7	13,6
21	618	277	17,5	2,76
22	619	268	18	3
23	620	270	14,6	2,4
24	621	330	17,5	1,9
25	622	317	16,7	2
26	623	328	17,8	2
27	633	360	15	1,4
28	634	354	16	1,5
29	635	382	15,8	1,3

песком. Диаметр основания конуса 10 мм

Таблица 3.9. Условия проведения экспериментов с мерзлым водонасыщенным

N⁰	№ эксп	V ₀ ,м/с	Fmax, кН	С
1	565	329	18	1,4
2	566	318	27	2,2
3	569	214	15	2,75
4	570	218	16	2,8
5	571	151	11	4
6	572	205	12,15	2,4
7	578	149	9,5	3,6
8	606	134	11	5,1
9	607	176	15,7	4,27
10	608	152	13	4,7
11	609	174	14,4	4
12	610	153	11,3	4
13	611	125	10	5,39
14	612	156	10,6	3,66
15	613	210	17	3,2
16	614	275	22	2,4
17	615	276	18,5	2
18	617	278	20,6	2,2
19	628	333	26	1,97
20	629	339	22	1,6
21	630	332	20	1,5

песком. Диаметр основания конуса 12 мм

Fmax, С № № эксп V₀,м/с κН 4,26 2,9 1,89 32,6 22,5 6,9 25,8 5,39 2,8 1,6 52,2 1,7 3,2 3,9 33,5 2,1

Таблица 3.10.Условия проведения экспериментов с замороженнымм влажным (10%) песком. Диаметр основания конуса 20 мм

N⁰	№ эксп	V ₀ ,м/с	Fmax, кН	C
1	453	153	11	6,2
2	454	163	14	7
3	455	264	14,5	2,76
4	456	249	17	3,6
5	457	270	18,5	3,36
6	460	174	11,9	5,2
7	461	43	8	57,41326
8	462	34	5,2	59,6
9	463	85	6	11
10	464	79	7	14,8
11	465	90	8	13,1
12	466	25	4,2	89,1
13	472	252	17,9	3,7
14	473	347	19,7	2,1
15	474	334	19,4	2,3
16	480	367	18	1,77
17	486	356	20	2,
18	487	151	10	5,8
19	584	131	11,5	8,89
20	595	214	13	3,76

Таблица 3.11.Условия проведения экспериментов с замороженнымм влажным (10%) песком. Диаметр основания конуса 10 мм



Рис.3.26. Зависимости силы сопротивления прониканию конических оголовков в мерзлый водонасыщенный песок от времени для различных диаметров основания конуса при скоростях удара ~130 м/с

Для скоростей более 300 м/с (рис.3.27) максимумы силы у конусов с диаметром основания 20 мм и 10 мм отличаются примерно в 3 раза, что также меньше ожидаемого из полученного соотношения отношения площадей. На начальном участке импульсы силы для ударников с различным основанием практически совпадают. Максимум силы сопротивления для оголовка 10 мм. достигается в момент времени полного погружения конической части (~ 25 мкс после начала соударения). Следует отметить, что дальше (через 5 мкс) наблюдается рост силы на 20 %, связанный, по всей видимости, с приходом отраженных от стенок контейнера волн нагрузки. Так как скорость распространения волн сжатия в мерзлом грунте порядка 3-4 км/с, то по самым грубым оценкам влияние стенок начинает сказываться на измеряемые импульсы через 20 мкс (время пробега волн от центра контейнера и обратно), что близко к 30 мкс, полученным в эксперименте. Максимумы силы достигаются в момент полного погружения конуса. Максимум силы для 12 мм конуса превышает значение максимума для 10 мм 120

конуса примерно в 1,4 раза, что близко к соотношению площадей их миделевых сечений. На зависимостях силы сопротивления от времени хорошо видно, что для конуса 20 мм. в момент времени 30 мкс после начала соударения наклон фронта импульса силы уменьшается, что по всей видимости также связано с приходом волн разгрузки на ударник.



Рис.3.27. Зависимости силы сопротивления прониканию конических оголовков в мерзлый водонасыщенный песок от времени для различных диаметров основания конуса при скоростях удара ~350 м/с

Для грунта с влажностью 10 % при скоростях порядка 130 м/с (рис.3.28) также видно, что начальные участки (25-30 мкс) зависимостей силы сопротивления от времени для конусов с различными диаметрами ударника практически совпадают. Максимумы силы достигаются также в момент времени близкий к полному погружению конуса (порядка 67 мкс для 10 мм ударника, 80 мкс для 12 мм, и 133 мкс для 20 мм ударника). Для конуса 10 мм вслед за максимумом следует спадание силы с 11 кН до 6 кН, затем сила практически не меняется в течении порядка 100 мкс. Далее следует

возрастание силы от взаимодействия грунта с основанием конического ударника диаметром 20 мм. Для конического оголовка с диаметром основания 20 мм наклон фронта импульса примерно через 60 мкс после начала соударения кривой уменьшается. Вероятно, это связано с приходом волн разгрузки от границ образца.

Для скоростей удара превышающих 300 м/с (рис.3.29) амплитуды импульсов силы для ударников различных диаметров отличаются в 3,5 раза, что близко к отношению площадей их миделевых сечений.



Рис.3.28. Зависимости силы сопротивления прониканию конических оголовков в замороженный влажный песок (10%) от времени для различных диаметров основания конуса при скоростях удара ~130 м/с.

Зависимости максимальных значений сил сопротивления от скорости удара, полученные в экспериментах с замороженным песком различной влажности приведены на рис.3.30 -3.31. Для ударников с различными диаметрами оснований эти зависимости линейны. Следует отметить разброс экспериментальных точек от их среднего значения, который составил ~20 %, что возможно связано о разбросом исходных свойств замороженных образцов грунта.



Рис.3.29. Зависимости силы сопротивления прониканию конических оголовков в замороженный влажный песок (10%) от времени для различных диаметров основания конуса при скоростях удара ~300 м/с



Рис.3.30. Зависимости сил сопротивления прониканию в мерзлый водонасыщенный песок от скорости удара для конусов с разными основаниями



Рис.3.31. Зависимости сил сопротивления прониканию в замороженный влажный (10%) песок от скорости удара для конусов с разными основаниями

3.4. 3. Результаты численного моделирования ударного взаимодействия конических ударников с мерзлым грунтом

Для анализа процессов, происходящих при соударении твердых тел с мерзлым грунтом, и выбора условий проведения обращенных экспериментов, далее используются численные методы расчета, которые позволяют оценить влияние геометрических размеров контейнеров на интегральные нагрузки, действующие на начальной нестационарной стадии внедрения в мерзлый грунт [14]. В расчетах использовалась математическая модель динамики грунтовой среды С.С.Григоряна [41] содержит систему дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса И максимальной плотности, достигнутой в процессе активного нагружения грунта. Применяются также уравнения теории пластического течения в дифференциальной форме с условием пластичности Мизеса-Шлейхера $s_{ii}s_{ii} = 2\sigma_T^2/3$, где s_{ii} – компоненты девиатора тензора напряжений Коши, σ_T – предел текучести, по повторяющимся индексам производится суммирование.

Применяемая математическая модель грунтовой среды С.С.Григоряна описывает разрушение структуры мерзлого грунта при сжатии и увеличение величины сопротивления сдвигу с ростом давления.

Параметры модели грунта (5), (6) следующие: $\rho_0 = 2100 \text{ кг/м}^3$, $p_e = 7$ МПа, *К*=21000 МПа, G=7875 МПа (определен при значении коэффициента Пуассона 1/3), a=1400 м/с, b=4, $\sigma_0=14$ МПа, k=0.5, $\sigma_M=50$ МПа, $k_f=0.2$. Выбор значений параметров обусловлен следующими соображениями. До значений напряжений 15-20 МПа, соответствующих пределу прочности мерзлого грунта при сжатии [78], грунт ведет себя аналогично линейноупругой среде. При давлениях порядка 200 МПа и температуре около -20°С происходит фазовый переход лед-вода [120] и мерзлый грунт ведет себя также, как водонасыщенный грунт, параметры уравнения состояния для которого определены ранее [63]. Скорость продольной волны С, определяемая наклоном диаграммы деформирования (6) на начальном

участке, равна $\sqrt{(K+4G/3)/\rho_0} = 3.8$ км/с, скорость сдвиговой волны $\sqrt{G/\rho_0} = 1.9$ км/с [1, 18-20]. При превышении предела прочности на сжатие, скорость продольной волны падает до значений 1.5 км/с, что соответствует разрушению скелета мерзлого грунта.

Численные расчеты осуществлялись в рамках методики [6], основанной на модифицированной схеме Годунова и реализованной в пакете прикладных программ НИИМ ННГУ «Динамика 2» [5]. Проведенные ранее расчеты процессов удара и проникания осесимметричных ударников в сухой и влажный песчаный грунт показали хорошее соответствие численных и экспериментальных результатов.

Далее приводятся результаты расчетов проникания конических ударников с углом при вершине 60 градусов и диаметрами основания d = 10, 12 и 20 мм при скоростях внедрения $V_0 = 150$ и 300 м/с. Образец грунта имел цилиндрическую форму диаметром 54 мм и высотой 65 мм. Анализируются два варианта задания краевых условий, моделирующие абсолютно жесткий и абсолютно податливый контейнеры.

Прямоугольное сечение цилиндрической области грунта разбивается разностной сеткой на квадратные ячейки с размером сторон d/n, n - число ячеек. Для анализа сходимости используемой модификации метода Годунова [6] проводилась серия численных расчетов на сгущающихся сетках. Изменение максимального значения силы в зависимости от размера ячейки d/n оказалось близко к линейному с достоверностью не менее 0.95, отличие значений сил при n = 100 от прогнозируемого при $n = \infty$ составило 10-15% [39].

На рис. 3.32 приведены безразмерные силы сопротивления внедрению конического ударника в мерзлый грунт, полученные в осесимметричных численных расчетах с применением краевых условий, моделирующих действие жесткого контейнера (a) и при его отсутствии (б). Значения силы сопротивления и времени отнесены, соответственно, к величинам

$$F^* = \frac{1}{2} \rho_0 S_0 V_0^2$$
 и $t^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d}{V_0}$, $S_0 = \pi d^2/4$ - площадь основания конуса. Кривыми 1, 2

и *3* показаны результаты расчетов внедрения конусов с диаметром основания *d* =10, 12 и 20 мм соответственно с постоянной скоростью 150 м/с; кривыми *4* - *6* представлены аналогичные результаты при скоростях удара 300 м/с.



Рис. 3.32. Безразмерные зависимости силы сопротивления внедрению со скоростями 150 (кривые 1-3) и 300 м/с (кривые 4-6), полученные в расчетах в предположении абсолютной жесткости контейнера (*a*) и при его отсутствии (*б*)

Заметим, что максимальное значение достигается при t/t*~0,95, что может быть связано с более быстрым ростом смоченной поверхности (поверхности ударника, непосредственно взаимодействующей с грунтом) вследствие образования брызговой струи и подъемом свободной поверхности грунта навстречу ударнику при ударе. Значение силы сопротивления на этот времени будем момент называть максимальным значением силы сопротивления внедрению. При $t > t^*$, после момента внедрения конической части ударника рост площади контактной поверхности не происходит, и силы сопротивления внедрению наблюдаемые изменения связаны с действием краевых условий, обусловленным отраженными от границ области (стенок контейнера) волнами сжатия-разрежения.

Из рис. 3.32 б видно, что влияние краевых условий на максимальное значение силы сопротивления внедрению ударника с диаметром основания d=12 мм не превышает 10% при скорости внедрения 150 м/с и уменьшается с ростом скорости. Сила сопротивления внедрению ударника с диаметром основания d=10 мм до момента $t < t^*$ практически не зависит от вида краевых условий. Существенное влияние краевые условия оказывают на силу сопротивления внедрению ударника с диаметром основания d=20 мм: при изменении скорости внедрения со 150 м/с до 300 м/с различие максимальных значений уменьшается с 60% до 15%.

Рассматривались также задачи проникания ударников в грунт при скорости внедрения 300 м/с, в интервале времени 0 < t < 1.5t эквивалентные задачам проникания в полупространство. Отмечено установление практически постоянного (квазистационарного) уровня силы сопротивления внедрению после достижения максимального значения, которое практически совпадает со значением, полученным в расчетах с применением краевого условия, моделирующего абсолютно жесткий контейнер.

На рис. 3.33. приводятся безразмерные зависимости от скорости удара максимальных значений силы сопротивления внедрению конусов с диаметром основания d = 10 (*a*), 12 (*б*) и 20 мм (*в*), полученные в обращенных экспериментах и численных расчетах (темные и светлые треугольники соответственно), сплошной И штриховой линиями нанесены аппроксимирующие зависимости. Наблюдается хорошее соответствие данных, экспериментальных И расчетных которые проводились В предположении абсолютной податливости контейнера (условие свободной границы на поверхности грунта), для всех рассмотренных диаметров конических ударников.



Рис. 3.33. Безразмерные зависимости максимальных значений силы сопротивления внедрению в мерзлый грунт конусов с диаметром основания *d* =10 (*a*), 12 (*б*) и 20 мм (*в*), полученные в обращенных экспериментах и численных расчетах

Отметим также близость максимальных значений сил сопротивления внедрению конических ударников с диаметром основания 10 и 12 мм при скоростях удара более 150 м/с.

На рис. 3.34 представлены безразмерные зависимости максимальных значений силы сопротивления внедрению конуса от скорости удара в мерзлый (сплошная линия), уплотненный сухой (темные треугольники и штриховая линия) и водонасыщенный грунт (светлые треугольники и штрихпунктирная линия). Маркеры соответствуют данным обращенного эксперимента, линиями показаны результаты осесимметричных численных расчетов проникания конуса в полупространство грунта. Видно, что сопротивление мерзлого грунта прониканию при малых скоростях удара существенно превышает сопротивление сухого и тем более водонасыщенного грунта. При скоростях удара более 300 м/с наблюдается тенденция сближения кривых сопротивления мерзлого и водонасыщенного грунта. По всей видимости, за счет трения и работы разрушения повышается температура мерзлого грунта, особенно на поверхности ударника, что еприводит к его оттаиванию.

Таким образом, в задачах проникания в мерзлый и водонасыщенный грунт достаточно хорошее (вполне удовлетворительное) соответствие экспериментальных и расчетных данных может быть получено с использованием модели С.С. Григоряна при учете зависимости параметров модели от давления.

С использованием вычислительного эксперимента установлено, что максимальные значения сил сопротивления внедрению слабо зависят от материала используемых контейнеров. Путем сравнения результатов физического и численного эксперимента показано, то упругопластическая модель С.С. Григоряна адекватно описывает реальные процессы проникания цилиндрических ударников с различными головными частями в песок, находящийся в различных состояниях (сухой, влажный, мерзлый).

На рис.3.35 приведены зависимости безразмерной силы сопротивления внедрению конуса от скорости удара для мерзлого грунта различной исходной влажности (10% и 18%). Там же приведены подобные зависимости для замороженного грунта, испытанного при температуре 20°C. Видно, что при скоростях удара ~ 100 м/с сила сопротивления для мерзлого водонасыщенного песка превосходит силу, действующую на конус при проникании в водонасыщенный песок при комнатной температуре в 3 раза. С повышением скорости удара различие уменьшается до 1,4 - 1,5 раза. Для влажного (10%) замороженного песка при скоростях ~ 100 м/с силы

сопротивления при разных температурах испытания отличаются более чем в 3 раза, при скоростях более 350 м/с отличие составляет 30-40%. Отмеченный характер изменения сил сопротивления внедрению с ростом скорости может быть связан с адиабатическим разогревом, а также с увеличением сил трения, что также приводит к повышению температуры на поверхностях ударника и грунта. Этот разогрев, по-видимому, приводит к оттаиванию замороженного грунта и образованию слоя воды на поверхности грунта, которая выступает в качестве смазки и уменьшает силы трения.



Рис. 3.34. Безразмерные зависимости от скорости удара максимальных значений силы сопротивления внедрению в мерзлый, сухой и водонасыщенный грунт, полученные в обращенных экспериментах и численных расчетах



Рис.3.35. Сравнение зависимостей безразмерной силы сопротивления от скорости для грунта различной влажности и температуры

Выводы к главе 3

1. Проведено исследование проникания полусферического ударника в сухой песок в диапазоне скоростей удара от 20 до 350м/с в прямой постановке. Определены интегральные нагрузки, действующие на ударник на квазистационарной стадии внедрения. Отмечено хорошее качественное количественное соответствие полученных в данной работе результатов с Показано, авторов. ЧТО полученные данными других зависимости описываются двухчленным выражением типа Понселе и Резаля

2. В обращенной постановке исследовано проникание полусферических и конических ударников в песок различной влажности в диапазоне скоростей от 70м/с до 400м/с. Получены зависимости максимальных сил сопротивления внедрению от скорости удара для полусферы и конических ударников с углом полураствора 30⁰. Показано, что для сухого песка и песка влажностью 10% максимальные силы сопротивления внедрению практически совпадают для полусферы. Эта закономерность справедлива и для конуса и цилиндра с плоским торцем. Для них отличия максимальной силы сопротивления внедрению в сухой и влажный грунт (влажность 10%) такжеминимальны.

3. При проникании конических и полусферических ударников в водонасыщенный песок максимальные силы сопротивления в 1,5 – 2 раза меньше, чем для сухого песка и песка влажностью 10%.

4. Выявлено, что при проникании плоского торца в водонасыщенный песок импульс сжатия, сформировавшийся в стержне, подвержен сильной дисперсии. Проведенный численный анализ показал, что в обращенном эксперименте для плоского торца максимальная сила сопротивления определяется с большой погрешностью. Поедложен алгоритм обработки полученных импульсов, который позволяет вычислять квазистационарное значение силы сопротивления в этих экспериментах с достаточной для практических приложений точностью.

5. Проведено экспериментальное исследование проникания конического ударника с углом полураствора 30° в мерзлый песок различной исходной

влажности (10% и 18%) при температуре -18°С. Получены зависимости сил сопротивления для конусов с различными диаметрами основания в диапазоне скоростей от 100 м/с до 400 м/с. Проведен теоретический анализ процесса соударения мерзлого грунта в контейнере с коническим ударником. Выявлено, что влияние стенок контейнера практически не сказывается на величину максимальной силы сопротивления прониканию для конуса с основанием 10 мм.

6. Выполнено сравнение сил сопротивления внедрению конуса в мерзлый песок различной влажности (10% и 18%) при температуре -18° С и такой же грунт при комнатной температуре. Получено, что с ростом скорости удара различие между силами сопротивления для мерзлого и не мерзлого грунта убывает от 2,5 - 3 раз при скорости 150 м/с до 30 - 40% при скоростях удара 400 м/с.

Заключение.

- 1. Модернизирован комплекс для экспериментального исследования основных закономерностей ударного взаимодействия осесимметричных деформируемых тел с мягкими грунтами в прямом эксперименте с использованием цифровой скоростной киносьемки. Развита методика определения интегральных нагрузок, действующих на проникающее тело на квазистационарном участке внедрения с использованием результатов обработки процесса проникания, кинограмм которая существенно определения коэффициента сопротивления уменьшает погрешность внедрению.
- 2. Осуществлено численное моделирование прямого эксперимента с целью оценки влияния волн, отраженных от стенок контейнера, на результаты измерения интегральных нагрузок, численно определены временные интервалы достоверного определения коэффициента сопротивления. Показано, что при выбранной геометрии ударника и контейнера влияние стенок контейнера не оказывает существенного влияния на полученные результаты в исследуемом временном интервале процесса проникания.
- 3. В прямой постановке проведено экспериментальное исследование проникания полусферического ударника в сухой песок в диапазоне скоростей удара от 20 до 350м/с. Определены интегральные нагрузки, действующие на ударник на квазистационарной стадии внедрения. Показано, что зависимости описываются двухчленным выражением типа Понселе и Резаля. Отмечено хорошее качественное и количественное совпадение полученных в данной работе результатов с данными других авторов.
- 4. В обращенной постановке исследовано проникание цилиндрических ударников с полусферическими и коническими головными частями в песок различной влажности в диапазоне скоростей от 70м/с до 400м/с. Получены зависимости максимальных сил сопротивления внедрению полусферы и конических ударников с углом полураствора 30⁰ от скорости удара.

Показано, что для полусферы в случае сухого песка и песка влажностью 10% максимальные силы сопротивления внедрению практически совпадают. Подобный характер поведения имеет место для ударников другой формы - конуса и цилиндра с плоским торцем.

- 5. Экспериментально показано, что при проникании конических и полусферических ударников в водонасыщенный песок максимальные силы сопротивления в 1,5 – 2 раза меньше, чем для сухого песка и песка влажностью 10%.
- 6. Выявлено, что при проникании ударника с плоским торцем в водонасыщенный песок импульс сжатия, сформировавшийся в стержне, подвержен сильной дисперсии. Поэтому в обращенном эксперименте для плоского торца максимальная сила сопротивления определяется с большой погрешностью. Численно показано, что квазистационарное значение силы сопротивления в этих экспериментах определяется с достаточной для практических приложений точностью.
- 7. Впервые проведено экспериментальное исследование проникания конического ударника в мерзлый песок различной влажности (10% и 18%) при температуре -18°C. Получены новые данные о силах сопротивления для конусов с различными диаметрами основания в диапазоне скоростей от 100 м/с до 400 м/с. Проведен теоретический анализ процесса соударения мерзлого грунта в контейнере с коническим оголовком. Выявлено, что влияние стенок контейнера практически не сказывается на величину максимальной силы сопротивления прониканию конуса с основанием 10 Проведено сравнение сил сопротивления внедрению конуса в MM. мерзлый песок различной влажности и такой же грунт при нормальной температуре. Показано, что с ростом скорости удара различие между силами сопротивления для мерзлого и не мерзлого грунта при скоростях удара 400 м/с убывает до 30 - 40%, в то время как при скоростях до 130-140 м/с это различие может достигать 3-5 раз.

8. Модернизированные экспериментальные комплексы в дальнейшем будут использованы для изучения ударного взаимодействия деформируемых и твердых тел с преградами различной физической природы, в том числе грунтами (при различных температурах испытания), горными породами, бетонами. Полученные в работе экспериментальные результаты могут быть использованы для верификации математических моделей грунтовых сред и численных расчетов ударного взаимодействия твердых тел с грунтовыми средами.

Список литературы

- Абузяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40. № 6. С. 940-953.
- Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок.//Механика. Сб. переводов. М.:ИЛ.№6, 1957г., С.125–137.
- 3. Афанасьев В.И., Захаров В.М. Высокоскоростная кинорегистрация взаимодействия слоистой стержневых ударников co преградой// Современные проектирования отработки методы И ракетноартиллерийского вооружения Сб.докл. научной конференции Волжского регионального центра РАРАН. Саров 2000г. С.452-454
- Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л Экспериментально-теоретическое исследование процессов проникания жестких ударников и идентификация свойств грунтовых сред. // Изв. СО РАН. ПМТФ. 2009. Т. 50. № 6. С. 115-125.
- 5. Баженов В.Г., Зефиров С.В., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Мат. моделирование. 2000. Т. 12. № 6. С. 67-72.
- Баженов В.Г., Котов В.Л. Модификация численной схемы Годунова применительно к решению задач импульсного нагружения мягких грунтов // Изв. СО РАН. ПМТФ. 2002. Т. 43. № 4. С. 139-149.
- Баженов В.Г., Котов В.Л., Баландин В.В., Крылов С.В., Брагов А.М., Цветкова Е.В. экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой// Изв. СО РАН. ПМТФ. 2001. Т. 42. № 6. С. 190-198.
- Баландин В.В. Экспериментальное изучение процессов проникания осесимметричных тел в мягкие грунтовые среды. диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Нижний Новгород, 2001

- Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Котов В.Л.
 Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду//Журнал технической физики, 2016, т.86, в.6, с.62-70.
- 10.Баландин В.В., Брагов А.М. Лабораторная установка для изучения процессов соударения.//Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов. Всесоюзн. межвуз. сб./ Горьк. ун-т. 1990.С.112-115.
- 11.Баландин В.В., Брагов А.М., Игумнов Л.А., Котов В.Л., Ломунов А.К., Константинов А.Ю. Динамическое деформирование мягких грунтовых сред: экспериментальные исследования и математическое моделирование // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 3. С. 69-77.
- 12.Баландин Вл.Вл. Установка для исследования процессов высокоскоростного соударения//Проблемы прочности и пластичности, 2013, вып. 75,с.232-237
- Баландин Вл.Вл., Крылов С.В., Повереннов Е.Ю., Садовский В.В., Численное моделирование ударного взаимодействия упругого цилиндра со льдом// Проблемы прочности и пластичности, т.79, №1, 2017, с.93-103
- 14.Баландин Вл.Вл., Котов В.Л., Баландин В.В., Константинов А.Ю., Линник Е.Ю. Применение методики обращенного эксперимента к сопротивления внедрению исследованию конического ударника В замороженный песок// Проблемы прочности и пластичности, т.79, №2, 2017,c.182-193.
- 15.Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. Под ред. Н.А.Златина и Г.И.Мишина. М.:Наука 1974г., 344 с.
- 16.Баничук Н.В., Иванова С.Ю. Оптимизация формы жесткого тела, внедряющегося в сплошную среду. Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Вып. 69. 2007. С. 47–57.

- 17.Баничук Н.В., Иванова С.Ю., Макеев Е.В. О проникании неосесимметричных тел в твердую деформируемую среду и оптимизация их формы // Изв. РАН. МТТ. 2008. № 4. С. 176–183.
- 18.Бердников В.А., Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Могилев В.А., Травов Ю.Ф., Файков Ю.И., Фатеев Ю.А. Экспериментальное исследование движения конусов и цилиндра в песчаной среде/II научная конференция Волжского регионального центра РАРАН. Сборник докладов, Саров, 2003, С.276-279.
- 19.Бивин Ю.К. Движение тела вблизи свободной поверхности жидкости или пластической среды//МТТ, 2001, №3, С.112-122.
- 20.Бивин Ю.К., Глухов Ю.М., Пермяков Ю.В. Вертикальный вход твердых тел в воду//МЖГ, 1985, №6, С. 3-9.
- 21.Бивин Ю.К. Прямое проникание группы тел в упругопластическую среду//МТТ, 1996, №1, С.80-87.
- 22.Бивин Ю.К. Каверна при вертикальном входе твердых тел в упругопластическую среду //МТТ, 1997, №1, С.93 –101
- 23.Бивин Ю.К. Сравнительная оценка проникания звездообразных и конических тел//МТТ, 1999, №4, С.113-117.
- 24.Бивин Ю.К. Движение тела вблизи свободной поверхности жидкости или пластической среды//МТТ, 2001, №3, С.112-122.
- 25.Бивин Ю.К., Викторов В.В., Степанов Л.П. Исследование движения тела в глинистой среде//МТТ, 1978, №2, С.159-165.
- 26.Бивин Ю.К., Викторов В.В., Коваленко Б.Я. Определение динамических характеристик грунтов методом пенетрации//МТТ, 1980, №3, С.105-110.
- 27.Бивин Ю.К., Колесников В.А., Флитман Л.М. Определение механических свойств среды методом динамического внедрения//МТТ, 1982,№5,С.181-184
- 28.Бивин Ю.К. Проникание твердых тел в сыпучие и слоистые среды // Изв. РАН. МТТ. 2008. № 1. С. 154-160.

- 29.Брагов А.М., Баландин В.В., Ломунов А.К., Филиппов А.Р. Методика определенияударной адиабаты мягких грунтов по результатам обращенных экспериментов// Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 11. С. 52-55.
- 30.Брагов А.М., Баландин Вл.Вл., Котов В.Л, Баландин Вл.Вл., Линник Е.Ю. Экспериментальное исследование удара и проникания конического ударника в мерзлый песок // Прикладная механика и техническая физика, 2018, №3, с.111-120.
- 31.Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Баландин Вл.Вл. Оценка радиальной деформации образца на основе теоретико-экспериментального анализа методики динамических испытаний материалов в жесткой обойме.//Проблемы прочности и пластичности, т.78,№4, 2016, с.359-368.
- 32.Брагов А.М., Гандурин В.П., Грушевский Г.М., Ломунов А.К. Методические особенности изучения динамической сжимаемости мягких грунтов в диапазоне давлений 0,05 – 1,5 ГПа./Хим. Физика.195. Т.14, № 2-3, С. 126 – 135.
- 33.Брагов А.М., Константинов А.Ю., Медведкина М.В. Дисперсия волн в разрезных стержнях Гопкинсона при динамических испытаниях хрупких материалов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 6 (1). С. 158–162.
- 34.Бухарев Ю.Н., Гандурин В.П. Силы, действующие на острый конус в нестационарной стадии внедрения в воду и грунт// Прикл. пробл. прочн.и пласт. Всесоюзн. межвуз. сб. Вып.53, 1995, С.46-55.
- 35.Бухарев Ю.Н., Гандурин В.П., Кораблев А.Е., Морозов В.А., Хаймович М.И. Экспериментальное исследование проникания недеформируемого ударника в глинистую среду и снег//Прикл. пробл. прочн.и пласт. Анализ и оптимизация. Всесоюзн. межвуз. сб. 1991 г., С.99-106.

- 36.Бухарев Ю.Н., Кораблев А.Е, Хаймович М.И. Экспериментальное определение касательных напряжений на поверхности ударника при динамическом внедрении в грунт//МТТ, 1995, №2, С.186-188.
- 37.Велданов В.А. Ударное взаимодействие тел с грунтом и бетоном//Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Сб. тезисов международной конференции III Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 26.02-2.03.2001. С.120.
- 38.Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И и др. Расчёт проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием пьезоакселерометрии // ЖТФ. 2011., Т.81., Вып.7., С. 97-104.
- 39.Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В. Численное моделирование взрывных процессов в мерзлом грунте // Изв. РАН. МТТ. 2006. № 6. С. 128-136
- 40.Голдсмит В. Удар и контактные явления при средних скоростях// Физика быстропротекающих процессов.-М.:Мир. 1971. т.2.-С.153-203
- 41.Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов// ПММ. 1960. Т. 24. №6. С. 1057-1072.
- 42.Григорян С.С. О приближенном решении некоторых задач динамики грунтов // ПММ. 1962.Т. 26. Вып. 5. С. 944–946.
- 43.Григорян С.С Новый закон трения и механизм крупномасштабных горных обвалов и оползней. // Докл. АН СССР. 1979. Т. 244. № 4. С. 846-849.
- 44. Григорян С.С. Приближенное решение задачи о проникании тела в грунт // Изв. АН СССР. МЖГ. 1993. № 4. С. 18–24.
- 45.Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов.-2-е изд., перераб.-М.:Наука,1975, с. 456
- 46. Дейвис Р. М. Волны напряжений в твердых телах. М.: ИЛ, 1961
- 47.Евсеенко Е.П., Зильбербрандт Е.Л., Пугачев Г.С. Рентгеновская установка для регистрации быстропротекающих процессов//ПТЭ 1979, №1, С. 210-211.

- 48.Зволинский Н.В. Об излучении упругой волны при сферическом взрыве в грунте // ПММ.1960. Т. 24. Вып. 1. С. 126–133.
- 49.Златин Н.А., Козачук А.И., Пугачев Г.С., Синани А.Б. Универсальная 9кадровая установка для высокочастотной фотографии//ЖТФ 1983, т.58, №6, С. 1154-1159.
- 50.Змушко В.В., Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Могилев В.А., Подорожный В.М., Травов Ю.Ф., Файков Ю.И., Фатеев Ю.А. Взаимодействие медного стержня с грунтовой преградой/II научная конференция Волжского регионального центра РАРАН. Анн. Докладов, Саров, 2001,С.90.
- 51.Зукас Д.А. Проникание и пробивание твердых тел/ Динамика удара.-М.:Мир. 1985, С.110-172.
- 52.Иванов А.С., Любарский С.Д., Хурс С.П. Движение тела в слое сыпучей среды//ПМТФ, 1991, №2, С.27-30.
- 53.Ишлинский А.Ю., Зволинский Н. В., Степаненко И.З. К динамике грунтовых масс // ДАН СССР. 1954. Т. 95, №4. С. 729–731.
- 54.Каминский М.В., Киселев Ю.Г., Копытов Г.Ф., Кочнев Ю.В., Лаптенков В.Н., Могилев В.А., Подорожный В.М., Снопков А.П., Файков Ю.И., Фатеев Ю.А. Результаты экспериментального исследования высокоскоростного внедрения стержня из сплава ВНЖ в плотную среду/II научная конференция Волжского регионального центра РАРАН. Анн. Докладов, Саров, 2001,С.89.
- 55.Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Кочнев Ю.В., Могилев В.А., Плюхин А.Т., Файков Ю.И., Чубаров В.Ф. Экспериментальные методы исследования динамики формирования каверны (кратера) в мягком грунте/II научная конференция Волжского регионального центра РАРАН. Сборник докладов, Саров, 2003, С.286-290.
- 56.Квинг-Юонг Ма. Экспериментальный анализ динамических механических свойств искусственно замороженной почвы с помощью методики разрезного стержня Гопкинсона // ПМТФ. 2010. Т. 51. № 3. С. 178-183.
- 57.Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. М.:ИЛ, 1955

- 58.Корнев В.М. Уточнение зависимостей метода составного стержня Кольского – Гопкинсона // ПМТФ. 1992. № 3. С. 127-131.
- 59.Котов В.Л., Баландин В.В., Баландин Вл.Вл. Исследование применимости методики обращенного эксперимента к определению динамических характеристик водонасыщенных грунтов//Вестник ПНИПУ Механика №3,2016, с. 97-107.
- 60.Котов В.Л., Баландин Вл.В., Брагов А.М., Линник Е.Ю., Баландин Вл.Вл.Применение модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению ударников в песчаный грунт // Изв. СО РАН. ПМТФ. 2013. Т. 54. №4. С. 114-125
- 61.Котов В.Л., Баландин В.В., Линник Е.Ю., Баландин В.В. Численный анализ методики прямого эксперимента при внедрении полусферического ударника в песчаный грунт / Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Вып. 73. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2011. С. 51-57.
- 62.Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл. Квазистационарное движение твердого тела в сыпучем грунте при развитой кавитации//Доклады РАН, 2013, т.451, вып 3, с.278-282.
- 63.Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл. Исследование динамического сопротивления сдвигу водонасыщенного песка по результатам обращенных экспериментов // Письма в ЖТФ. 2017. Т.43 №.17 С.64-70
- 64.Котов В.Л., Линник Е.Ю., Баландин В.В., Баландин Вл.Вл. О применимости модели локального взаимодействия для определения сил сопротивления внедрению сферы в нелинейно-сжимаемый грунт//Вычислительная механика сплошных сред.- 2012, т. 5, № 4, С. 435-443.
- 65.Коханенко И.К., Маклаков С.Ф., Прищепа Е.А. Определение предела прочности грунта на сдвиг при динамическом нагружении//МТТ, 1990, №4, С.182-184.
- 66.Крылов С.В., Цветкова Е.В., Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М. Экспериментально-теоретическое изучение процессов проникания сферических тел во влажный песок//ПМТФ, 2015, т56, №6, сс.46-50
- 67.Лагунов В.А., Степанов В.А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях//ПМТФ,№1,1963г.,С88 96.
- 68.Остапенко Н.А., Якунина Г.Е. Об особенностях движения тонкого тела в плотных средах //Докл. РАН. 1996. Т. 351. № 2. С. 192–195.
- 69.Остапенко Н.А. Тела вращения минимального сопротивления при движении в плотных средах // Успехи мех. 2002. № 2. С. 105–149.
- 70.Сагомонян А.Я. Проникание. М.: Изд-во МГУ. 1974. 299 с.
- 71.Саламандра Г.Д. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов/М.:Наука , 1974, 201 с
- 72.Симонов И.В. Об устойчивости движения удлиненного тела вращения в упругопластической среде при отрыве потока // ПММ. 2000. Т. 64. Вып. 2. С. 311–320.
- 73.Симонов И.В., Осипенко К.Ю. Устойчивость, траектории и динамический изгиб затупленного тела вращения при проникании в упругопластическую среду // ПМТФ. 2004. Т. 45.№ 3. С. 146–160.
- 74.Рахматуллин Х.А., Сагомонян А.Я., Алексеев Н.А. Вопросы динамики грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 239 с.
- 75. Томер Г. Рентгеноимпульсная техника // Физика быстропротекающих процессов.-М.:Мир. 1971. т.1.-С.336-381.
- 76.Фольрат К. Искровые источники света и высокочастотная искровая кинематография// Физика быстропротекающих процессов.-М.:Мир. 1971. т.1.-С.96-194
- 77.Цукерман В.А., Тарасова Л.В., Лобов С.И. Новые источники рентгеновских лучей//УФН 1971, т.103, №2, С.319-337.
- 78.Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Учебн. пособие. М.: Высш. школа. 1973. 448 с.

- 79.Чиченев Н.А., Кудрин А.Б.,Полухин П.И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением. М.:Металлургия, 1977.-311с.
- 80.Юношев А.С., Сильвестров В.В. Разработка методики полимерного разрезного стержня Гопкинсона // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 3. С. 212-220.
- 81.Allen W.A., Mayfield E. B, and Morrison H. L. Dynamics of a Projectile Penetrating Sand. Part II //Journal of Applied Physics 28, 1331 (1957); doi: 10.1063/1.1722645
- 82.Backman M.E., Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets//Int. Journ. Eng. Sci. 1978, V. 16, №1, pp.1-44.
- 83.Bacon C., Lataillade *J-L*. Development of the Kolsky-Hopkinson technics and applications for non-conventional testing / In New experimental methods in material dynamics and impact. Nowacki W.K. and Klepaczko J.R. (Eds). 2001. Warsaw. Poland. P. 1-58
- 84.Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Ballistic impact: Recent advances in analytical modeling of plate penetration dynamics – A Review // Appl. Mech. Reviews. 2005. V. 58. P. 355–371.
- 85.Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields // Central Europ. J. Engng. 2014. V. 4. № 1. P. 1–19.
- 86.Bless S. J., Berry D. T., Pedersen B., Lawhorn W Sand penetration by highspeed projectiles/ AIP conference proceedings 1195, 1361 (2009); doi: 10.1063/1.3295061
- 87.Bless S., Cooper W., Watanabe K, Peden R. Deceleration of projectiles in sand/Shock compression of condensed Matter-2011, AIP. Conf. proc. 1426, 45-47(2012)
- 88.Bless S., Cooper W., Watanabe K. Penetration of rigid roads into sand /3th Int. Symp. of Ballistics, Maimi, FL. Sept 12-16, 2011, pp. 1252-1257
- 89.Bless S, Peden B, Guzman I, Omidvar M, Iskander M. Poncelet coefficients of granular media / In: Song B, Casem D, Kimberley J, editors. Dynamic behavior

of materials, volume 1, Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Lombard, IL: Springer; 2014. pp. 373-80.

- 90.Borg J. P., Fraser A., and Van Vooren A. Ballistic Penetration Of Sand With Small Caliber Projectiles/AIP. Conf. 1426, 48 (2012); doi: 10.1063/1.3686218
- 91.Borg J.P., Morrissey M.P., Perich C.A, Vogler T.J., Chhabildas L.C. In situ velocity and stress characterization of a projectile penetrating a sand target: Experimental measurements and continuum simulations// International Journal of Impact Engineering ,51 (2013) pp.23-35
- 92.Borg J.P., Vogler T.J. Mesoscale simulations of a dart penetrating sand//Int. J. Imp. Eng., 35, 2008, pp 1435-1440
- 93.Borg, J.P., Vogler, J.T.: An experimental investigation of a high velocity projectile penetrating sand. In: XIth International Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA. Society of Experimental Mechanics Inc (2008)
- 94.Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.A., Tsembelis K., Proud W.G. The Determination of Physicomechanical Properties of Soft Soils From Medium to High Strain Rates // Int. J. Imp. Eng. 2008. V. 35. №9. P. 967-976.
- 95.Brar N.S., Hari Manoj Simha C. High strain rate compression and tension response of high hard tool steel//Proc. 6th Int. Conf. On Mech. And Phys. Behavior of Materials under Dyn. Load. Krakov 2000, pp.611-615.
- 96.Buchely M.F., Maranon A., Silberschmidt V.V. Material model for modeling clay at high strain rates//Int. J. of Imp. Eng. 90 (2016) 1–11
- 97.Christ M., Park J. Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils // Cold Regions Science and Technology. 2009. V. 58. P. 136-142.
- 98.Chang A. L. In-Situ Measurement of Penetrator Erosion Rate and Dynamic Flow Stress During Long-Rod Penetration/ ARL-TR-1187 August 1996
- 99.Chapman D.J, Tsembelis T, Proud W.G. The behavior of water saturated sand under shock loading. Proceedings of the 2006 SEM Annual Conference

- Collins A.L., Addiss J.W., Walley S.M., Promratana K., Bobaru F., Proud W.G., Williamson D.M. The effect of rod nose shape on the internal flow fields during the ballistic penetration of sand //Int. J. Impact Eng. 38, 951-963 (2011)
- 101. Collins J.A., Sierakowski R.L. Studies on the Penetration mechanics of Eglin sand/AFATL-TR-76-122, 1976, www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a038055.pdf
- 102. Dayal U., Allen J.H., Reddy D.V. Low. velocity projectile penetration of clay.//J.Geotherm Eng. Div. 1980., N8, pp, 919-937).
- Eldeman W.E., Bakken L.N. Loads on a conical body impacting sand and polyurethane foam//Sandia Corp. Livermore Lab. Jan. 1965, Contract AT(29-1)-789. SCL-DR-64-144.
- 104. Feldgun V.R., Yankelevsky D.Z., Karinski Y.S. A new simplified analytical model for soil penetration analysis of rigid projectiles using the Riemann problem solution//Int.J.Imp.Eng., v.110, 2016, p.181-197
- Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth // Int. J. . Imp. Eng. V.32 (2006), pp.1584–1594
- Follansbee P.S., Frantz C. Wave propagation in the split Hopkinson pressure bar // Journal of Engineering Materials and Technology. 1983. Vol. 105. № 1. P. 61–66. (doi:10.1115/1.3225620)
- 107. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D., Setchell R.E. Gas-gun experiments determine forces on penetrators into geological targets //Journ.Appl.Mech. 1984,V.51,№3, pp.602-607.
- 108. Forrestal M.J., Grady D.E. Penetration experiments for normal impact into geological targets//Int.J.Solids Structures, V.18, 1982, №1, pp. 229-234.
- Forrestal M.J., Longcope D.B., Norwood F.R. A model to estimate forces on conical penetrators into dry porous rock//J.Appl.Mech.V.48, 1981,№1, pp.25-29.

- 110. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s// J.Appl.Mech.V.51, 1984,№3, pp.602-607.
- 111. Gary G. Some aspects of dynamic testing with wave-guides / In New experimental methods in material dynamics and impact. Nowacki W.K. and Klepaczko J.R. (Eds). 2001. Warsaw. Poland. P. 179-222.
- 112. Goldsmith W., Wu W.-Z. Response of rocks to impact loading by bars with pointed ends//Rock Mech. 1981, V.13,№3,pp.157-184.
- Gong J.C., Malvern L.E., Jenkins D.A. Dispersion Investigation in the Split-Hopkinson Pressure Bar // Journal of Engineering Materials and Technology.
 1990 Vol. 112. #3. Pp. 309-314, (doi: 10.1115/1.2903329)
- 114. Gorham D.A. A numerical method for the correction of dispersion in pressure bar signals // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1983. Vol. 16. P. 477–479. (doi:10.1088/0022-3735/16/6/008)
- 115. Gooch W.A., Burkins M.S., Hauver G., Netherwood P., Benck R. Dynamic X-ray imaging of penetration of boron carbide//Proc. 6th Int. Conf. On Mech. And Phys. Behavior of Materials under Dyn. Load. Krakov 2000, pp.583-588.
- 116. Haimin Du, Wei Ma, Shujuan Zhang, Zhiwei Zhou, Enlong Liu. Strength properties of ice-rich frozen silty sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture contents // Cold Regions Science and Technology. 2016. V. 123. P. 107-113
- 117. Hauver G.E. Penetration with instrumented rods//Int. J. Engng. Sci. 1978, V.
 16, №4, pp.871-877.
- Hsieh D.Y., Kolsky H. An Experimental Study of Pulse Propagation in Elastic Cylinders // Proceedings of the Physical Society. 1961. Vol. 71. # 4. P. 608-612. (doi:10.1088/0370-1328/71/4/308)
- Lai Yuanming, Jin Long, Chang Xiaoxiao. Yield criterion and elasto-plastic damage constitutive model for frozen sandy soil // International Journal of Plasticity. 2009. V. 25. P. 1177–1205.

- 120. Lee M. Y., Fossum A., Costin L. S., Bronowski D. Frozen Soil Material Testing and Constitutive Modeling // SANDIA REPORT SAND2002-0524, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.Mex., March 2002. 67 p.
- 121. Ling X.Z., Zhang F., Li Q.L., An L.S., Wang J.H. Dynamic shear modulus and damping ratio of frozen compacted sand subjected to freeze-thaw cycle under multi-stage cyclic loading // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2015. V. 76. P. 111–121.
- 122. Liss J., Goldsmith W. Plate perforation phenomena due to normal impact by blunt cylinders//Int. J. Imp. Eng. 1984, V.2, №1, pp.37-64.
- 123. Longcope D.B., Forrestal M.J. Penetration of targets described by a Mohr-Coulomb failure criterion with a tension cutoff// J.Appl.Mech.V.50, 1983,№2, pp.327-332.
- Malvern L.E., Sierakowski R.L., Ross C.A., Milton J.E., Ting C.S., Collins J.A Study of Penetration Technology/ AFATL-TR-76-122.,1976
- 125. Martin B.E, Chen W, Song B, Akers S.A. Moisture effects on high strainrate behavior of sand// Mechanics of Materials 2009;41:786-98
- 126. Maynard D.K. Projectile impact and penetration dynamics correlation of analytical and experimental results//Proc. Int. Conf. Fract. Mech. And Technol., Hong Kong, 1977, vol. 2, Alphen van den Rijn, 1977, pp.1329-1342.
- 127. Merle R., Zhao H. On the errors associated with the use of large diameter SHPB, correction for radially non-uniform distribution of stress and particle velocity in SHPB testing // International Journal of Impact Engineering. 2006. Vol. 32. #12. Pp. 1964–1980. (doi:10.1016/j.ijimpeng.2005.06.009)
- 128. Park H., Chen W.W. Stress Variations and Particle Movements during Penetration into Granular Materials/ T. Proulx (ed.), *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1*, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 99,DOI 10.1007/978-1-4614-0216-9_11,.2011
- 129. Park J., Lee J. Characteristics of elastic waves in sand–silt mixtures due to freezing // Cold Regions Science and Technology. 2014. V. 99. P. 1-11.

- 130. Qijun Xie, Zhiwu Zhu, Guozheng Kang. Dynamic stress–strain behavior of frozen soil: Experiments and modeling // Cold Regions Science and Technology. 2014. V. 106-107. P. 153-160.
- 131. Rogers C.O., Pang S.S., Kumano A., Goldsmith W. Response of dry and liquid-filled porous rocks to static and dynamic loading by variously-shaped projectiles//Rock Mech. And Rock Eng. 1986, V.19,№4, pp.235-260
- 132. Savvateev A.F., Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg Ph.G High Speed Penetration into sand //Int. J. Imp. Eng. 26(2001), pp.675-681
- 133. Shujuan Zhang, Yuanming Lai, Zhizhong Sun, Zhihua Gao. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement // Cold Regions Science and Technology. 2007. V. 47. P. 263-270.
- 134. Sierakowski R.L., Malvern L.E., Collins J.A, Milton J.E., Ross C.A Penetrator Impact studies of soil/concrete / AFATL-TR-78-9,1977, https://archive.org/details/DTIC_ADA050603
- 135. Tyas A, Ozdemir Z. On backward dispersion correction of Hopkinson pressure bar signals // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2014. Vol. 37. # 2. P. 1-11. (DOI: 10.1098/rsta.2013.0291)
- Tyas A, Pope D.J. Full correction of first-mode Pochammer–Chree dispersion effects in experimental pressure bar signals // Measurement Science & Technology. 2005. Vol. 16. # 3. P. 642-652. (doi: 10.1088/0957-0233/16/3/004)
- 137. Van Vooren A., Borg J., Sandusky H. and Felts J. Sand Penetration: A Near Nose Investigation of a Sand Penetration Event// Procedia Engineering 58 (
 2013) pp.601 607
- 138. Waley S.M., Church P.D., Townsley R., Field J.E. Validation of pathdependent constitutive model for FCC and BCC metals using "symmetric" Taylor impact Proc. 6th Int. Conf. On Mech. And Phys. Behavior of Materials under Dyn. Load. Krakov 2000, pp.69-74.

- 139. Warren T. L., Hanchak S.J., Poormon K. L. Penetration of limestone targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations// Int. J.of Imp. Eng., 30, (2004) pp.1307–1331
- 140. Watanabe K., Tanaka K., Iwane K., Fukuma S., Takayama K. Kobayashi H. Sand Behavior Induced by High-Speed Penetration of Projectile./ AFOSR rep. AOARD-094011, Tokoyo, Japan, 2011
- 141. Zhiwu Zhu, Guozheng Kang, Yue Ma, Qijun Xie, Dan Zhang, Jianguo Ning. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading // Mechanics of Materials. 2016. V. 102. P. 108–116.
- 142. Zoltani C.K., White K.J., Di Bianka F.A. Flash X-ray computed tomography facility for microsecond events//Rev. Sci. Instr. 1986, V. 57, №4, pp. 602-611.
- 143. Yang R., Lemarchand E., Fen-Chong T., Azouni A. A micromechanics model for partial freezing in porous media // International journal of Solids and Structures. 2015. V. 75-76. P. 109-121.
- 144. Yugui Yang, Yuanming Lai, Jingbo Li. Laboratory investigation on the strength characteristic of frozen sand considering effect of confining pressure // Cold Regions Science and Technology. 2010. V. 60. P. 245-250.