

На правах рукописи



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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»
(НИИМ Нижегородского университета)

**Научный
руководитель:**

доктор технических наук, профессор
Брагов Анатолий Михайлович

**Официальные
оппоненты:**

Разоренов Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт проблем химической физики РАН, заведующий лабораторией реологических свойств конденсированных сред при импульсных воздействиях

Велданов Владислав Антонович, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры СМ-4

**Ведущая
организация:**

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита состоится "20" декабря 2018 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н.Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте diss.unn.ru/872

Автореферат разослан "12" ноября 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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.

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, У. Голдсмит, М. Форрестол, Дж. Бен-Дор, А. Дубинский, Д. Янкелевский и др. В нашей стране аналитические методы

исследования интенсивно развивались в институте проблем механики Академии наук в работах А.Ю. Ишлинского, Н.В. Зволинского, И.В. Симонова, Н.В. Баничука и др. и в институте механики МГУ в работах Х.А. Рахматулина, А.Я. Сагомояна, С.С. Григоряна, Н.А. Остапенко, Г.Е. Якуниной 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 НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского («Динамика-1», «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 («Медуза», СИГМА), а также зарубежные - Abaqus, ANSYS, LS-Dyna. 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, кривых ударной сжимаемости, закономерностей связывающих силы 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 процессов проникания, результаты которых необходимы 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. 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, М. Форрестол, Г. Ховер, Д. Мэйнард, Дж. Борг, С. Блесс, В.А. Лагунов, В.А. Степанов, Ю.К. Бивин, Ю.Н. Бухарев, В.А. Велданов, В.А. Бердников, М.В. Каминский, А.М. Брагов, В.В. Баландин 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 удастся. Для непосредственного определения силовых характеристик проникания на начальном, нестационарном участке чаще всего используются обращенные методы баллистического 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 мерзлые 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 варьировании параметров, характеризующих свойства 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 осесимметричных тел в сухой, влажный и замороженный песок естественного состава. Получение систематических 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.

Теоретическая значимость

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.

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:

- X 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.)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 12 из них в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России [1-12].

Личный вклад автора

- Модификация экспериментальных комплексов для проведения динамических испытаний по ударному взаимодействию твердых тел с различными преградами [1,7];

- Разработка программ обработки экспериментальных данных в программной среде LabView;
- Проведение экспериментальных исследований по прониканию твердых деформируемых тел в сухой песок в прямой постановке [3,7,13,14,16,17];
- Проведение экспериментальных исследований по прониканию твердых тел в грунтовые среды при различной температуре и влажности в обращенной постановке [2,4-7,9-12,14-19];

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 152 лист машинописного текста, 45 рисунков, 12 таблиц; список литературы включает 144 наименований.

Диссертационная работа выполнена при поддержке :

1. Научные и научно -педагогические кадры инновационной России 2009 - 2013 годы 2012 - 1.3.2 - 12 - 000 -1004
2. 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
3. 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)

Благодарности

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 по получению свойств грунтовых сред, Котову В.Л., Крылову С.В. за консультации и помощь в проведении численных расчетов.

Содержание работы

Во введении определена актуальность проблемы, сформулированы цели, отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе дан анализ существующих методов экспериментального изучения процессов ударного взаимодействия твердых деформируемых тел с грунтовыми средами, приведен подробный обзор ранее полученных результатов.

Отмечается вклад в развитие экспериментальных методов исследования процессов проникания таких отечественных и зарубежных ученых как W.A. Allen , M.J. Forrestal, J.P. Borg, J. Chen, S. Bless, J.A. Collins, R.L. Sierakowski, M.Y. Lee, D.K. Maynard, В.А. Лагунов, В.А. Степанов, Ю.К. Бивин, Ю.Н. Бухарев, В.А. Велданов, В.А. Бердников, М.В. Каминский и др.

Проблема определения контактных сил и ускорений, возникающих при взаимодействии ударника с мишенью, является важнейшей задачей динамики удара. При решении подобных задач используются экспериментальные методы, которые можно разделить на две группы: прямые и обращенные. В прямых экспериментах разогнанный ударник взаимодействует с неподвижной мишенью. В обращенных методах ударник неподвижен (по крайней мере, в начальный момент времени), а удар наносится разогнанной до нужной скорости преградой из исследуемого материала.

Отмечается, что в экспериментальных исследованиях процесса соударения твердых тел с преградами чаще всего регистрируют: глубину внедрения в зависимости от времени, конечную глубину внедрения, изменение скорости и ускорения ударника в процессе проникания.

Для регистрации перемещения ударника в прямых экспериментах используют метод рам-мишеней и его модификации, а также высокоскоростную кино- и рентгеновскую

съемку. Интегральные нагрузки, действующие на ударники различной формы на квазистационарной стадии внедрения, определяются с использованием зависимостей глубины проникания от времени и уравнений движения в форме Понселе и Резаля. Однако эти методы не позволяют достоверно определять силовые характеристики на начальном нестационарном участке проникания, а необходимость двойного дифференцирования опытных данных приводит к существенным погрешностям вычисления интегральных нагрузок.

В прямом и обратном экспериментах для измерения скорости ударника в процессе внедрения используются интерферометрические методы. Данные методы достаточно сложны, хотя и обладают высокой точностью при измерении скорости движения. Однако для получения интегральных нагрузок также требуется дифференцирование полученных зависимостей скорости проникания от времени, что может привести к существенному увеличению погрешности.

В прямом и обратном экспериментах для непосредственного измерения сил, действующих на твердое тело на начальном этапе внедрения, чаще всего применяются акселерометры. Следует отметить, что в прямых экспериментах при достаточно больших скоростях соударения ударников с мишенями трудно обеспечить надежную регистрацию сигнала с датчиков, размещенных на движущихся ударниках.

От этого недостатка свободны методики измерений ускорений в обратном эксперименте – в этой постановке ударник с акселерометром неподвижен по крайней мере в начальный момент времени. Недостатком обратных методик является необходимость разгонять контейнеры с грунтом достаточно большой массы и относительно небольшими геометрическими размерами.

В целом можно отметить, что вопрос определения интегральных нагрузок при движении твердых тел в песчаных средах экспериментально исследован недостаточно. Для решения данной проблемы предлагается использовать экспериментальный комплекс, реализующий измерение основных параметров процесса проникания в прямой и обратных постановках. Сочетание двух методик позволяет подробно исследовать общую картину взаимодействия ударника с грунтовыми мишенями и измерять интегральные нагрузки, действующие на ударник, как на нестационарном начальном этапе внедрения, так и на квазистационарной стадии.

Обзор основных результатов исследований процесса ударного взаимодействия ударника с грунтовыми средами показывает, что несмотря на то, что существует достаточно много экспериментальных данных, влияние влажности грунта и отрицательной температуры на характеристики проникания в песок изучены явно недостаточно. В связи с этим необходимы дальнейшие методические разработки и исследования основных закономерностей процесса проникания твердых тел в песчаные преграды в разных состояниях (сухие, влажные, мерзлые).

Вторая глава диссертации посвящена описанию модернизированного экспериментального комплекса методик и средств для исследования процессов соударения твердых и деформируемых тел с мягкими грунтами. Исследование процессов проникания ударников в мягкие грунты производилось в двух постановках эксперимента: прямой и обратной.

Методика прямого эксперимента, реализованная с помощью экспериментального комплекса на базе газовой пушки калибром 20 мм, описана в [1]. Далее изложена методика определения интегральных нагрузок по зависимостям «глубина проникания - время».

Уравнение, выражающее зависимость глубины внедрения от времени, решалось с помощью оригинальной компьютерной программы, разработанной в среде программирования LabView. В ней реализован алгоритм поиска корней нелинейного уравнения методом наименьших квадратов. В качестве исходных данных в программу вводится экспериментальная последовательность (X, t) , выражающая зависимость глубины проникания от времени, начиная от момента $t=0$ после погружения головной части ударника. В качестве выходных данных программа выдает значения коэффициента

сопротивления, связанного с силой сопротивления внедрению $C(t) = \frac{2F(t)}{\rho_0 V(t)^2 S}$,

вычисляемого по формуле

$$X = \frac{2m}{\rho_0 SC} \ln\left(\frac{\rho_0 SC}{2m} Vt + 1\right),$$

где m - масса ударника, ρ_0 - плотность песка, S - площадь миделева сечения ударника, V - начальная скорость, X - перемещение ударника, C - коэффициент сопротивления.

Для верификации представленной методики проводились численные расчеты проникания в песчаный грунт ударника массы m с начальной скоростью V . В расчетах был определен временной интервал, на котором изменение силы сопротивления пропорционально квадрату скорости внедрения (где коэффициент сопротивления постоянен). Была оценена длительность нестационарной стадии изменения силы сопротивления внедрению, а также время, начиная с которого будет существенным влияние на силу сопротивления волн сжатия, отраженных от стенок контейнера.

Расчет производился совместно с В.Л. Котовым, с использованием программного комплекса «Динамика-2», разработанного в НИИ механики. Численные расчеты проводились с использованием математической модели динамики грунтовой среды С.С. Григоряна. Параметры модели определялись по результатам экспериментов, проведенных в НИИ механики ННГУ А.М. Браговым и А.К. Ломуновым. Осесимметричные расчеты проводились на основе модифицированного метода Годунова и описаны в [3]. В расчетах получено, что длительность нестационарной стадии соответствует времени полного погружения головной части ударника в грунт. Влияние стенок жесткого контейнера в прямых экспериментах сказывается при $t=6t_0$ и $9t_0$ при $V_0=100$ и 200 м/с, соответственно, где t_0 - время погружения головной части ударника, определяемое отношением высоты конуса или радиуса полусферической головных частей к скорости удара.

Анализ погрешности данной методики показывает, что относительная ошибка определения коэффициента сопротивления составляет 15 - 25% и уменьшается с ростом скорости удара.

Основу модернизированной установки, реализующей методику мерного стержня в обращенном эксперименте составляют газовая пушка ПГ-57 калибром 57 мм, мерный стержень и комплекс регистрирующей аппаратуры. В этом методе контейнер с грунтом, разогнанный в стволе газовой пушки, ударяется о мерный стержень с навинченным на него цилиндрическим ударником с оголовком различной формы [7].

Для регистрации упругого импульса в мерном стержне на его боковой поверхности в сечении, находящемся на расстоянии 500 мм от ударяемого торца, наклеено через 90° по окружности четыре тензорезистора с базой 3 мм, соединенных последовательно. Тензорезисторы включены в потенциометрическую схему и для уменьшения уровня помех запитываются от аккумуляторов общим напряжением 50В.

При взаимодействии ударника и контейнера 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 $\varepsilon(t)$. Так как стержень и головная часть ударника не испытывают пластических деформаций, то напряжение и деформация в этой волне изменяется пропорционально действующей на торце силе, т.е. $F(t) = \varepsilon(t)ES$, где $\varepsilon(t)$ - деформации в стержне, E - модуль упругости материала стержня, S - площадь поперечного сечения стержня.

Запись информации с тензодатчиков и регистрация моментов срабатывания контактных датчиков измерителя скорости производится с помощью цифрового запоминающего осциллографа DSO 8064 фирмы Agilent. Максимальная частота дискретизации АЦП – 2 ГГц, полоса пропускания входных усилителей – 600 МГц.

Для обработки экспериментальных данных с использованием персонального компьютера была разработана программа в среде графического программирования

LabView. Данная 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 (F, t) .

Проведенный анализ погрешности измерения интегральных нагрузок в обращенном эксперименте показал, что величина относительной погрешности при определении силы сопротивления внедрению не превышает 10-15%.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса проникания ударников с различными головными частями в песок при различных температурах в прямой и обращенной постановке.

В первой части третьей главы описаны эксперименты в прямой постановке.

Эксперименты в прямой постановке проводились с сухим песком плотностью $1750 \pm 10 \text{ кг/м}^3$. В этих экспериментах использовались полусферические ударники массой $60 \pm 0,5 \text{ г}$, $80 \pm 0,5 \text{ г}$ и $96 \pm 0,5 \text{ г}$, изготовленные из стали 45 с HR_C40. Диаметр ударников составлял 19,8 мм, радиус полусферической части оголовка - 10 мм. Контейнер представляет собой стальной цилиндр с внутренним диаметром 130 мм и длиной 350 мм. Толщина его стенок и дна составляет 5 мм.

В экспериментах с помощью цифровой камеры регистрировались кинограммы процесса ударного взаимодействия проникающего тела с песчаной мишенью. По результатам обмера кинограмм были построены зависимости глубина проникания - время, по которым были вычислены коэффициенты сопротивления внедрению C . Коэффициенты сопротивления вычислялись на участке после полного погружения головной части ударника, т.е. без учета нестационарной стадии внедрения.

Внешний вид ударников после испытаний 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. Это явление можно объяснить тем, что в процессе ударного взаимодействия происходит интенсивное разрушение частиц песка, которое, по-видимому, сопровождается существенным повышением температуры этих частиц, что приводит к их спеканию, компактированию и осаждению на поверхности полусферы. При скоростях удара менее 130 м/с присоединенный конус не образовывался. Кроме того, в экспериментах не было обнаружено следов взаимодействия грунта с цилиндрической поверхностью ударника и примыкающей к ней частью полусферы, что свидетельствует о кавитационном характере процесса проникания.

Было обнаружено (рис.1), что C уменьшается более чем в два раза (с 5 до 2) в интервале скоростей удара от 30 до 140 м/с, далее с ростом скорости до 300 м/с уменьшается менее чем в полтора раза, что позволяет говорить о наличии некоторой критической скорости 140 м/с, при которой происходит смена режима обтекания. О наличии подобной скорости упоминается в работах У. Аллена, Ю.К. Бивина и др.

Таким образом в полученной зависимости $C(V)$ имеются два участка, которые аппроксимируются различными соотношениями. При $V_0 > 140 \text{ м/с}$ имеет место зависимость вида

$$C = \alpha + \gamma/V_0^2, \text{ где } \alpha = 1,429, \text{ а } \gamma = 21120 \text{ м}^2/\text{сек}^2,$$

а при скорости $V < 140 \text{ м/с}$ зависимость вида

$$C = \alpha + \beta/V_0, \text{ где } \alpha = 1,639, \text{ а } \beta = 135,6 \text{ м/с}.$$

Таким образом сила сопротивления на квазистационарном участке внедрения при скорости удара V_0 более 140 м/с выражается зависимостью

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

где ρ_0 - плотность песка, S - площадь основания полусферического оголовка ударника, α и γ - постоянные, приведенные выше.

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

При скоростях удара V_0 меньше 140 м/с сила сопротивления на квазистационарном участке выражается зависимостью

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

где ρ_0 - плотность песка, S - площадь основания полусферического оголовка ударника, α и β - постоянные, приведенные выше. 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. Разный характер зависимостей, по видимому, связан с тем, что при скоростях меньше критической имеет место скольжение частиц песка по поверхности ударника и существенную роль, наряду со скоростным напором, в сопротивлении прониканию играет сухое трение. При скоростях больше критической на головной части ударника образуется присоединенный конус и обтекание идет по его поверхности, следовательно дополнительный вклад в силу сопротивления внедрения вносят и сдвиговые свойства песка.

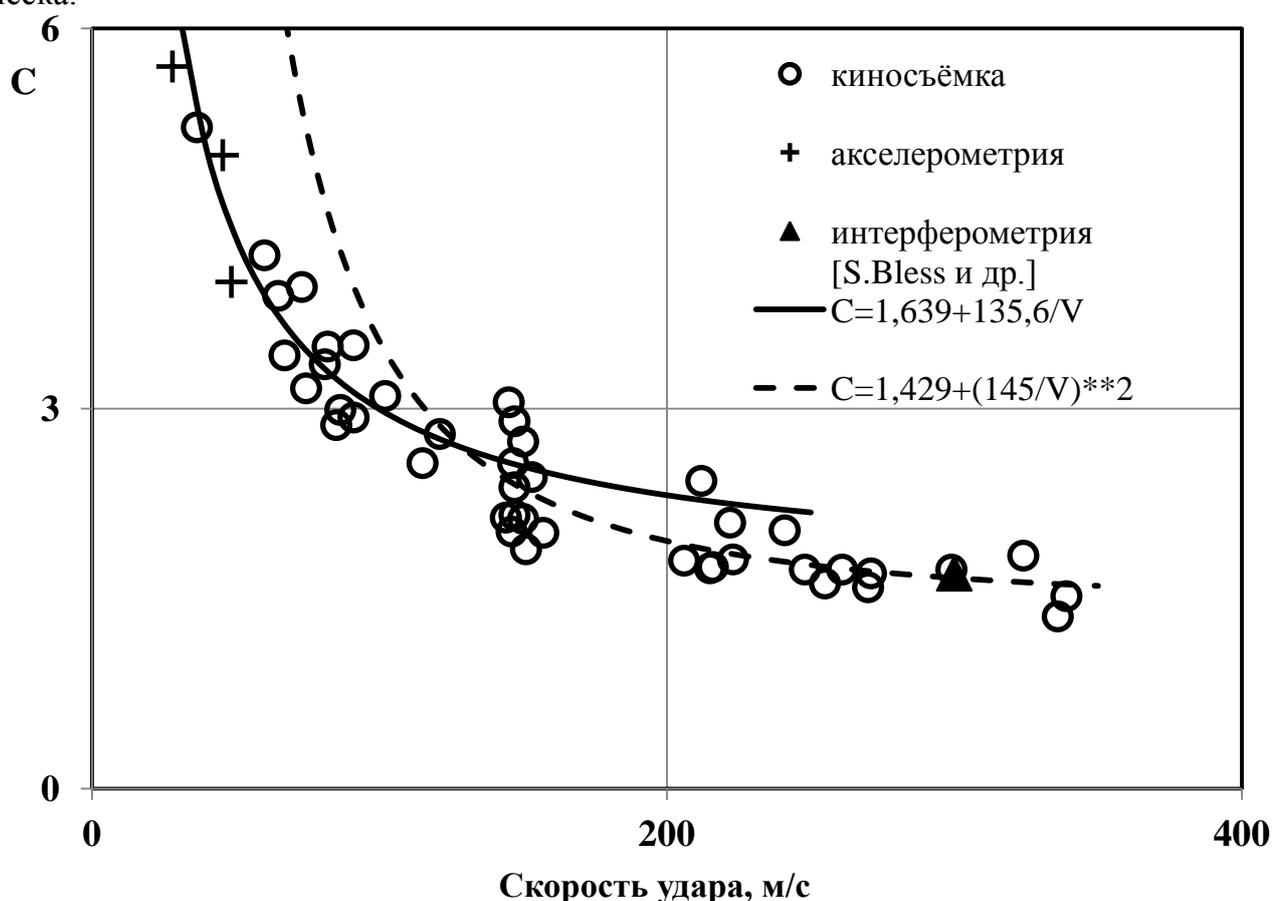


Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости удара для полусферы по данным прямого эксперимента

Во второй части третьей главы исследовалось проникание цилиндрических ударников с различной формой головной части (полусфера, плоский торец цилиндра и конус с углом $2\alpha=60^\circ$) в песок различной влажности при комнатной температуре в обращенной постановке.

На установке ПГ-57, в состав которой входила газовая пушка калибром 57 мм, мерный стержень диаметром 20 мм и длиной 1,5 м, с использованием методики обращенного эксперимента определялись зависимости силы сопротивления от времени для цилиндрических ударников трех типов: плоского торца, полусферы и конуса с углом $2\alpha = 60^\circ$ в сухой, влажный (влажность 10%) и водонасыщенный (влажность 18-20%) песок. Диаметр основания конуса и диаметр полусферы составляли 20 мм. Ударники были

сделаны из высокопрочной стали с пределом текучести более 2000 МПа. Исследования проводились с песком естественного состава (использовался тот же песок, что и в прямых экспериментах) плотностью в сухом состоянии $1750 \pm 50 \text{ кг/м}^3$ с размерами частиц 0,1-1 мм в диапазоне скоростей удара 50 – 400 м/с. Средняя плотность водонасыщенной естественной смеси составляла 2100 кг/м^3 , а песка с влажностью 10% 1920 кг/м^3 .

Контейнеры для грунта были выполнены 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.

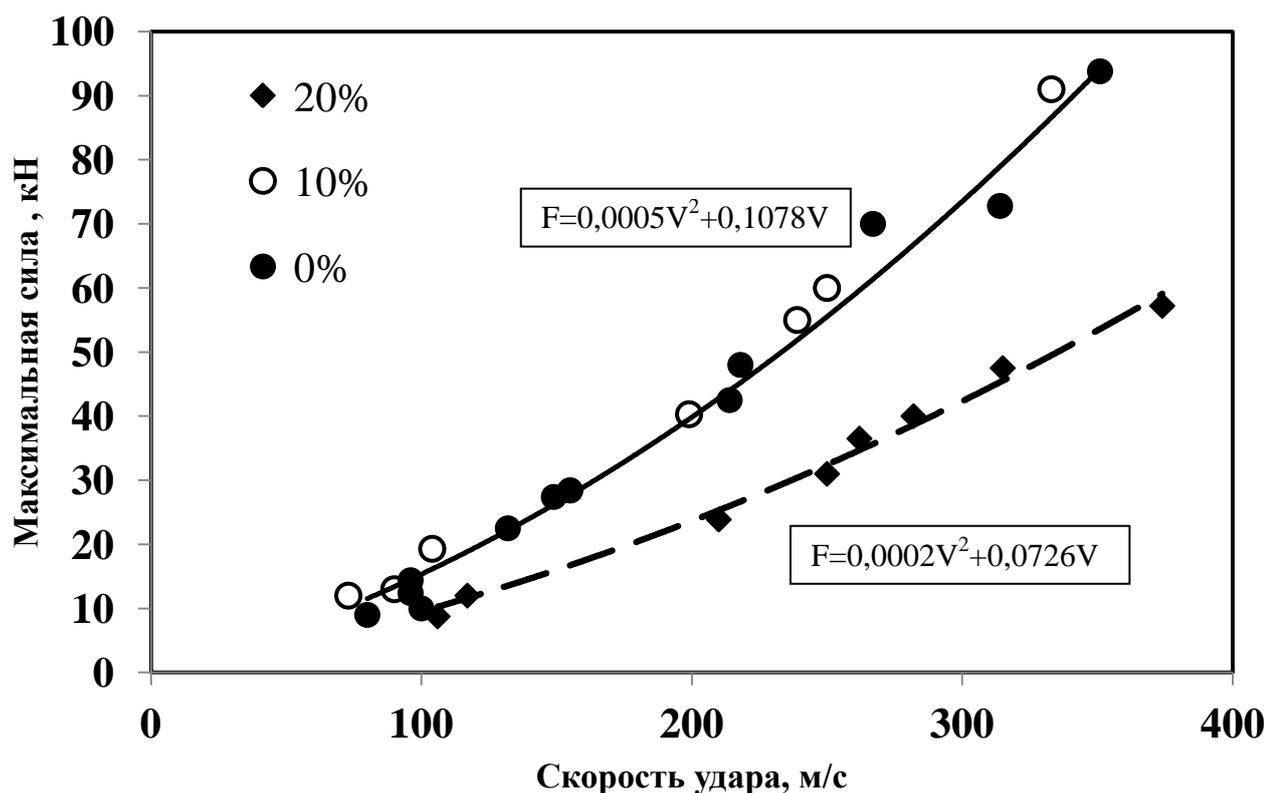


Рис.2. Зависимость максимальной силы сопротивления от скорости удара для полусферы при проникании в песок различной влажности

Для полусферы (рис.2) получено [6], что максимальные силы сопротивления при проникании в сухой и влажный (10% влажности) песок практически одинаковы и в 1,5 - 2 раза выше, чем максимальная сила сопротивления прониканию полусферы в водонасыщенный песок. Проведенные численные расчеты проникания полусферы в водонасыщенный песок в обращенной постановке с использованием программного комплекса «Динамика-2» показали, что в исследуемом диапазоне скоростей удара отсутствует влияние на максимальное значение силы сопротивления внедрению волн, отраженных от стенок контейнера. Следует отметить, что результаты полученные в данной работе для сухого и водонасыщенного песка практически совпадают с результатами других авторов.

Полученные результаты по прониканию конуса с углом $2\alpha = 60^\circ$ в песок с влажностью 10% и водонасыщенный песок с влажностью около 20% свидетельствуют (рис.3.) о том, что и в этом случае экспериментальные данные для сухого песка и песка влажностью 10% практически совпадают.

При проведении экспериментов по прониканию цилиндрического ударника с плоским торцом в песок различной влажности выявлено, что максимумы силы для сухого песка и

песка влажностью 10% практически совпадают для всех скоростей удара. Однако в экспериментах с песком влажностью 20% выяснилось, что измеренный импульс в различных сечениях мерного стержня подвержен сильной дисперсии, проявляющейся в наличии колебаний большой амплитуды на хвостовой части импульса, сравнимой с амплитудой самого импульса.

Использование методики для коррекции формы импульса, основанной на точном решении Похгаммера-Кри и применении прямого и обратного преобразований Фурье для водонасыщенного песка [5,11] не позволило достоверно восстановить импульс силы, действующий на плоский торец стержня на нестационарной стадии проникания. В то же время показано, что значение силы сопротивления на квазистационарном участке внедрения восстанавливается достаточно точно. Об этом свидетельствуют результаты, представленные на рис.4.

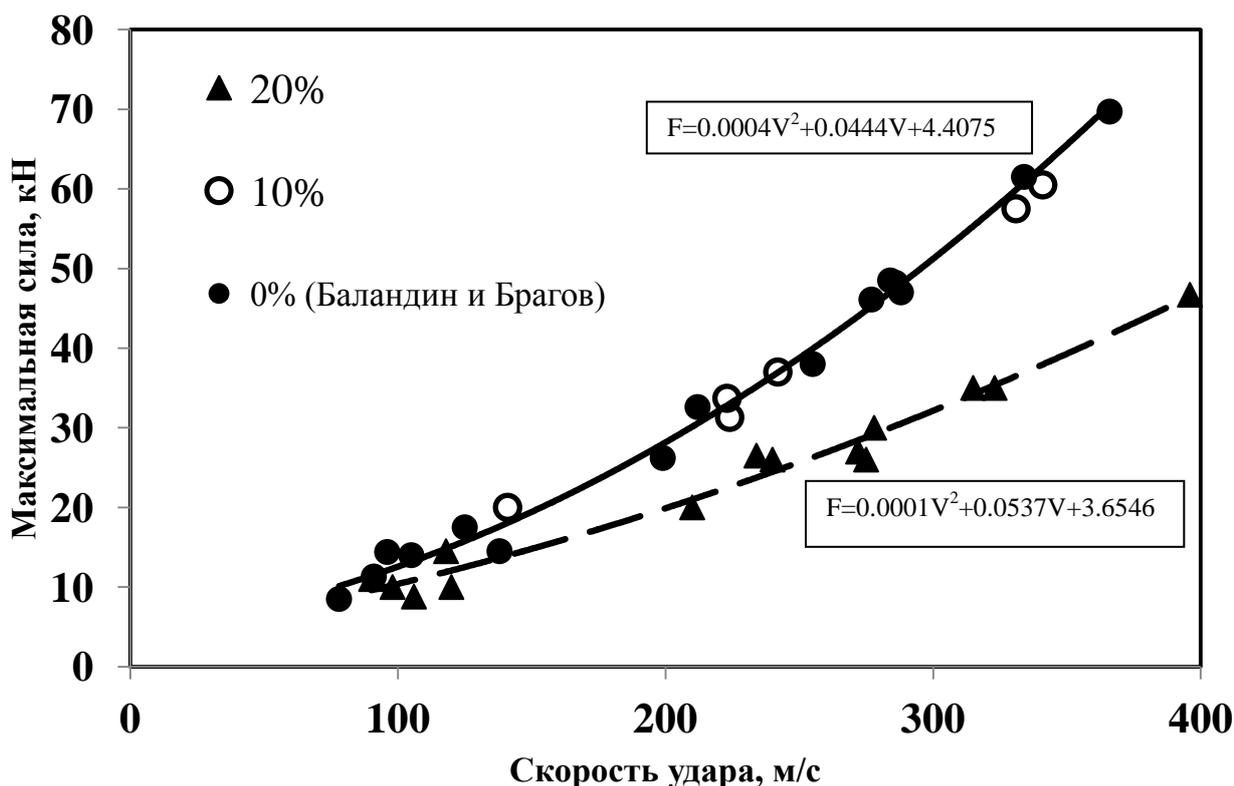


Рис.3. Зависимости максимальной силы сопротивления от скорости удара для конуса при проникании в песок различной влажности

Здесь приведены результаты сравнения значений коэффициента сопротивления C на квазистационарном участке внедрения для водонасыщенного песка, полученные в данной работе в обращенных экспериментах, с данными, полученными в прямых экспериментах Коллинзом и Сиераковским. Видно, что результаты, полученные в работе Коллинза и Сиераковского близки к результатам автора, что, наряду с результатами численных экспериментов, подтверждает достоверность определения C в обращенном эксперименте.

В третьей части третьей главы приведены экспериментальные результаты по прониканию цилиндрических ударников разного диаметра с коническими головными частями в мерзлый песок влажностью 10% и 18% в обращенной постановке

Эксперименты проводились с песком влажностью 10% и 18% замороженным при температуре -18°C . Состав песка идентичен песку, использованному в разделе 3.2. Эксперименты проводились в диапазоне скоростей до 400 м/с. Всего проведено более 100 опытов с коническими оголовками с углом полураствора конуса 30° . Для оценки влияния стенок контейнера в обращенном эксперименте исследовалось проникание ударников с различным диаметром основания: 10, 12 и 20 мм.

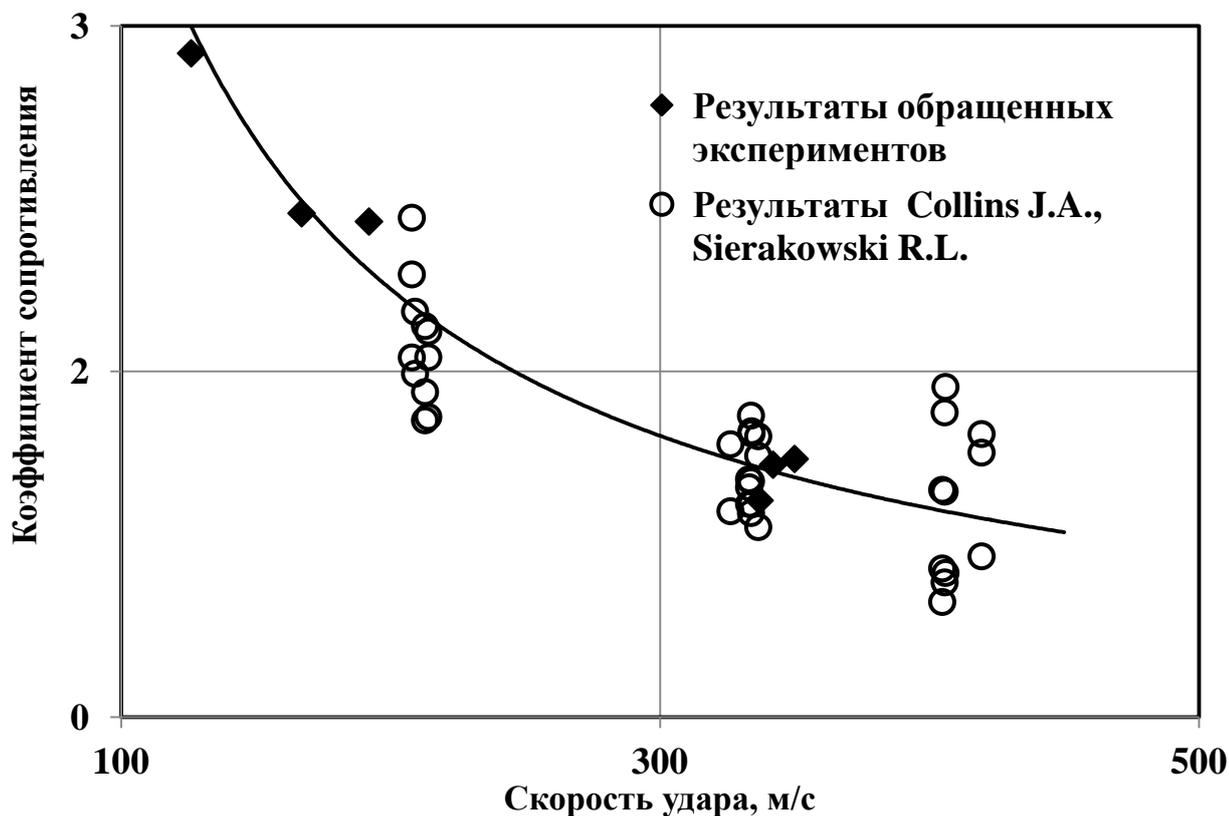


Рис.4. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости удара для плоского торца в случае водонасыщенного песка

Зависимости максимальных значений сил сопротивления, полученные в экспериментах с замороженным песком различной влажности, приведены на рис.5 - 6. Обнаружено, что зависимости $F_{\max}(V)$ различаются для разных диаметров оснований, но близки к линейным для всех использованных диаметров основания конуса. Разброс экспериментальных точек от среднего значения составил $\sim 20\%$, что может быть связано с разбросом исходных физико-механических свойств замороженных образцов грунта.

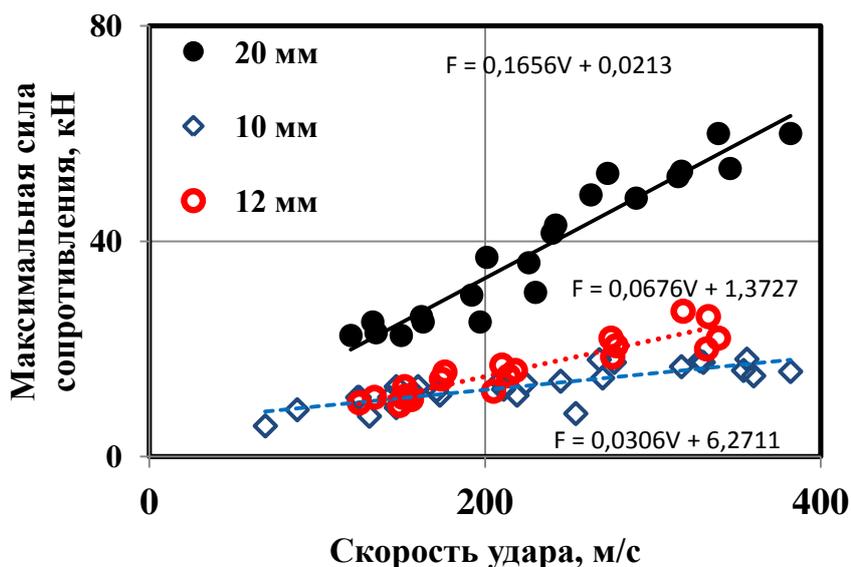


Рис.5. Зависимости сил сопротивления прониканию в мерзлый водонасыщенный песок от скорости удара для конусов с различными основаниями

Для более глубокого понимания процессов, происходящих при соударении твердых тел с грунтом, и выбора условий проведения обращенных экспериментов проведен численный расчет взаимодействия разогнанного в контейнере грунта с ударником, который позволил оценить влияние геометрических размеров контейнеров на интегральные нагрузки, действующие на начальной нестационарной стадии внедрения в мерзлый грунт [12]. Показано, что влияние стенок контейнера практически не сказывается на величину максимальной силы сопротивления прониканию конуса с основанием 10 мм.

На рис.7 приведены зависимости безразмерной силы сопротивления (которая на квазистационарном участке внедрения соответствует коэффициенту сопротивления) от скорости удара для конуса в случае мерзлого грунта различной исходной влажности (10% и 18%). Там же приведены подобные зависимости при 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 температуре 20°C, в 3 раза. С повышением скорости удара различие уменьшается в 1,4 - 1,5 раза. Для влажного (10%) замороженного песка при скоростях ~ 100 м/с силы сопротивления при разных температурах отличаются более чем в 3 раза, однако 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, которые приводят 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.

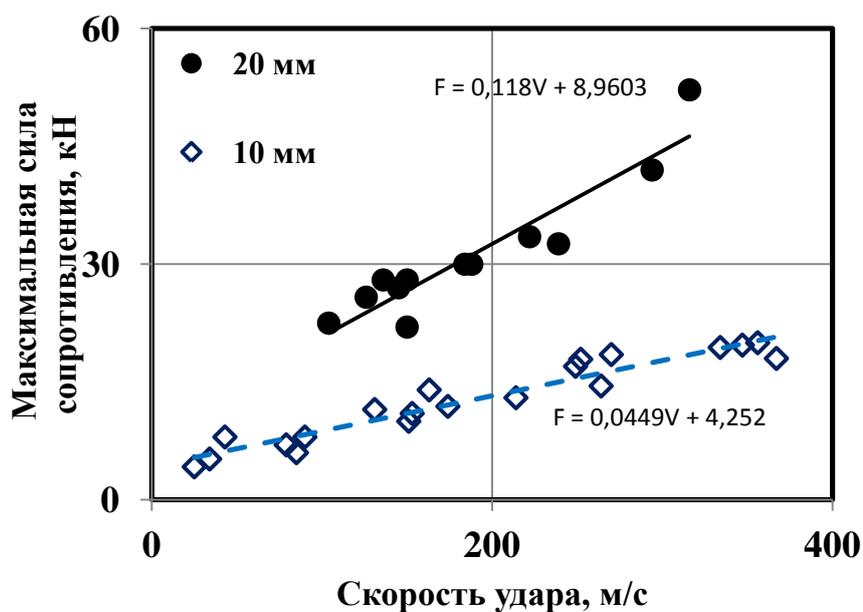


Рис.6. Зависимости сил сопротивления прониканию в замороженный влажный (10%) песок от скорости удара для конусов с разными основаниями.

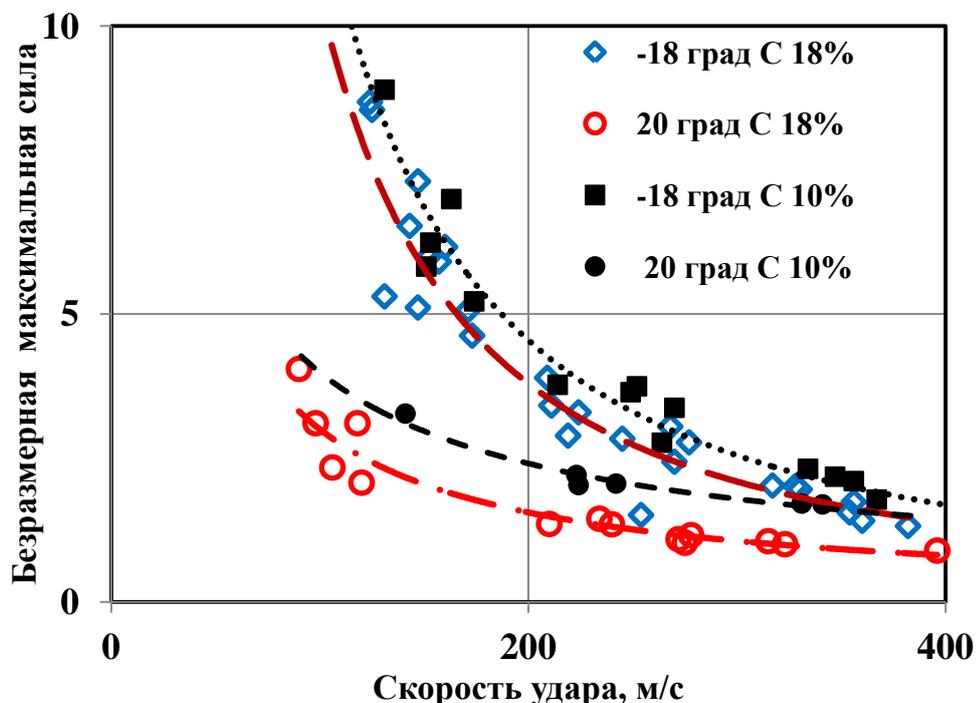


Рис.7 Сравнение зависимостей безразмерной максимальной силы сопротивления от скорости для грунта различной влажности и температуры

Основные результаты и выводы.

1. Модернизирован комплекс для экспериментального исследования основных закономерностей ударного взаимодействия осесимметричных деформируемых тел с мягкими грунтами в прямом эксперименте с использованием цифровой скоростной киносъемки. Развита методика определения интегральных нагрузок, действующих на проникающее тело на квазистационарном участке внедрения с использованием результатов обработки кинограмм процесса проникания, которая существенно уменьшает погрешность определения коэффициента сопротивления 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 350 м/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 70 м/с до 400 м/с. Получены зависимости максимальных сил сопротивления внедрению полусферы и конических ударников с углом полураствора 30° 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 торцом 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 мм. Проведено сравнение сил сопротивления внедрению конуса в 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России:

1. **Баландин Вл.Вл.** Установка для исследования процессов высокоскоростного соударения// Проблемы прочности и пластичности, 2013, вып 75(3), с.232-237.
2. 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.
3. Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин В.В., **Баландин Вл.Вл.** Квазистационарное движение твердого тела в сыпучем грунте при развитой кавитации//Доклады РАН, 2013, т.451, вып 3, с.278-282.
4. Котов В.Л., Брагов А.М., Линник Е.Ю., Баландин В.В., **Баландин Вл.Вл.** Применение модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению ударников в песчаный грунт//Прикладная механика и техническая физика, 2013, т.54, №4. сс.114-125
5. 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.
6. 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//Прикладная механика и техническая физика, 2015, т56, №6, с.46-50.
7. 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.
8. 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.

9. Котов В.Л., **Баландин Вл.Вл.**, Брагов А.М., Баландин В.В. Исследование динамического сопротивления сдвигу водонасыщенного песка по результатам обращенных экспериментов// Письма в журнал технической физики, т.43, №17,2017, с.64-70.

10. **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

11. **Баландин Вл.Вл.**, Котов В.Л., Баландин В.В., Константинов А.Ю., Линник Е.Ю. Применение методики обращенного эксперимента к исследованию сопротивления внедрению конического ударника в замороженный песок// Проблемы прочности и пластичности, т.79, №2, 2017,с.182-193.

12. 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.

Материалы докладов на научных конференциях:

13. Баландин В.В., Крылов С.В., Цветкова Е.В, **Баландин Вл.Вл.** Экспериментальное изучение и численный анализ внедрения полусферических ударников в сухой песок. //X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Тезисы докладов. Н.Новгород, 2011, с1992-1995

14. Брагов А.М., **Баландин Вл.Вл.**, Баландин В.В., Константинов А.Ю., Котов В.Л., Ломунов А.К. Экспериментально-теоретические и численные исследования закономерностей поведения мягких грунтовых сред при ударе и проникании//Всероссийская конференция "Взрыв в физическом эксперименте": Тезисы докладов. 16-20 сентября 2013 г. Новосибирск. с.140-141.

15. **Баландин Вл.Вл.**, Брагов А.М., Проникание полусферических оголовков в сухой и водонасыщенный песок//Форум молодых ученых: Тезисы докладов. Том 1. - Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им.Н.И.Лобачевского, 2013. – с. 49-50.

16. Брагов А.М., Котов В.Л., **Баландин Вл.Вл.**, Баландин В.В., Линник Е.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование движения сферического тела в песчаном грунте//Труды XVIII международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы конструкций и сплошных сред" им. Горшкова. Т. 1. – М.: ООО «ТР-принт». 2012. С. 32-33.

17. Брагов А.М., Котов В.Л., Баландин В.В., **Баландин Вл.Вл.** Экспериментально-теоретическое исследование закономерностей поведения грунтовых сред при ударе и проникании//Забабахинские научные чтения: Тезисы XI Международной конференции, Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ, 16-20 апреля 2012, с.229

18. Брагов А.М., Котов В.Л., Ломунов А.К., **Баландин Вл.Вл.**, Баландин В.В. Проникание конических и полусферических оголовков в песчаный грунт различной влажности//Материалы XXI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им.А.Г.Горшкова. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Москва, 2015. т.2, с.12-13.

19. Баландин В.В., **Баландин Вл.Вл.**, Брагов А.М., Цветкова Е.В. Проникание в песок различного гранулометрического состава и влажности// XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник докладов (Казань, 20–24 августа 2015 г.) – Казань: Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015, с.304-306.

Подписано в печать 18.10.2018.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 624.

Отпечатано в РИУ Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского.
603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.