

На правах рукописи



Пирогов Сергей Александрович

**Исследование деформирования и разрушения
малопластичных разносопротивляющихся
сред при ударных воздействиях**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Садырин Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Рузанов Александр Иванович
доктор физико-математических наук,
с.н.с. Ломунов Андрей Кириллович

Ведущая организация: Нижегородский филиал Института
машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Защита состоится 1 марта 2012 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, ГСП 1000, просп. Гагарина, д. 23, корп. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан « 27 » января 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.166.09
д.ф.-м.н., проф.



Игумнов Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При создании эффективных средств защиты современных инженерных сооружений и технических объектов от воздействия интенсивных динамических нагрузок широкое применение получили бетоны, керамики, скальные и полускальные горные породы и другие искусственные и естественные материалы, относящиеся к классу разнсопротивляющихся материалов. Причиной возникновения ударных нагрузок в элементах защитных устройств, выполненных из таких материалов, могут быть природные катастрофы, террористические акты, нештатная работа оборудования, техногенные аварии. С целью снижения трудоёмкости и материальных затрат, связанных с прочностным расчетом конструкций из малопластичных разнсопротивляющихся материалов, при решении прикладных задач оправдано применение расчетно–экспериментального метода, сочетающего проведение натурных экспериментов и полномасштабного компьютерного моделирования.

Для адекватного численного моделирования поведения конструкций из разнсопротивляющихся материалов при интенсивных нагрузках требуются оснащенные соответствующим набором материальных функций и констант математические модели, реалистично описывающие сложный характер процессов динамического деформирования и разрушения данных сред. В частности, модели должны учитывать физическую нелинейность поведения материала, зависимость деформационных и прочностных свойств от вида напряженного состояния и скорости деформирования, непропорциональность путей нагружения. Использование упрощенных математических моделей при компьютерном моделировании может привести к существенному искажению результатов численного решения задач. Современное состояние экспериментальных методов и лабораторного оборудования не позволяет осуществлять прямое экспериментальное определение необходимого набора материальных функций и констант, получение их возможно только на основе косвенных опытных данных и экспериментально наблюдаемых корреляционных зависимостей.

Таким образом, формулировка, апробация и обоснование применимости моделей динамического деформирования и разрушения разнсопротив-

ляющихся материалов, снабжение их соответствующими наборами материальных функций и физико-механических констант представляет собой сложную комплексную проблему, а тема диссертационной работы актуальна и востребована.

Цели работы

□ Развитие и компьютерная реализация математической модели динамического деформирования и разрушения малопластичных разнсопротивляющихся сред при интенсивном ударном воздействии.

□ Формулировка в рамках расчетно–экспериментального подхода системы базовых экспериментов для оснащения модели деформирования и разрушения разнсопротивляющихся материалов (бетона, твердых горных пород) материальными функциями и константами при ударных контактных нагрузках.

□ Исследование чувствительности численного решения задач внедрения жестких ударников в мишени из малопластичных разнсопротивляющихся материалов к изменению параметров уравнений модели.

□ Проведение анализа нестационарных процессов ударного взаимодействия и проникания ударников в бетоны и горные породы, исследование влияния прочностных характеристик преград и скоростей соударения на силы сопротивления внедрению, величины перегрузок, глубины проникания и характер разрушения мишеней.

Объект и методы исследования. В работе проводится анализ модели динамического деформирования и разрушения разнсопротивляющихся сред, включающей уравнения трёх предельных поверхностей, зависящих от инвариантов тензора напряжений, скорости деформаций и параметра поврежденности. Исследуется влияние параметров модели на протекание основных стадий динамического деформирования и разрушения разнсопротивляющихся материалов (стадии упругого и упругопластического (с накоплением повреждений) деформирования, неравновесной релаксации напряжений (разрушение материала) и поведения фрагментированного (разрушенного) материала) при контактном взаимодействии жестких ударников с малопластичными мишенями.

Компьютерное моделирование ударного взаимодействия осуществляется с помощью программных комплексов «Динамика–2» и «Upsgod», при-

меняемых в численных расчетах НИИМ ННГУ, реализованных на основе явной конечно-разностной схемы типа «крест» в переменных Лагранжа для модифицированной схемы Уилкинса и совместного лагранжево–эйлерового подхода в рамках метода Годунова.

Научная новизна

□ Развитие математической модели, включающей уравнения трёх предельных поверхностей, позволяющее описать основные стадии процессов динамического деформирования и разрушения малопластичных разносопротивляющихся сред типа бетона, скальных и полускальных горных пород при интенсивных ударных воздействиях. Уравнения предельных поверхностей зависят от трех инвариантов тензора напряжений, скорости деформаций и параметра поврежденности.

□ В рамках расчетно-экспериментального подхода предложена система базовых экспериментов по определению констант и материальных функций математической модели динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся сред, включающая в себя лабораторные опыты по построению динамических диаграмм деформирования и эксперименты по внедрению жестких ударников в разносопротивляющиеся материалы.

□ Результаты численных расчетов по внедрению жестких ударников с различной формой головной части в малопластичные разносопротивляющиеся материалы, характеризующие зависимости максимальных перегрузок и финальных глубин проникания от скорости соударения и прочностных характеристик мишени.

Основные положения, выносимые на защиту

□ Соотношения математической модели динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся сред, включающие уравнения трёх предельных поверхностей (текучести, разрушения, течения фрагментированного материала), зависящих от среднего напряжения, интенсивности напряжений, угла фазы девиатора напряжений (вида НДС) и уровня повреждений.

□ Формулировка двух групп базовых экспериментов и реализация, в рамках расчетно-экспериментального подхода, методики оснащения константами и материальными функциями математической модели динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся сред, ориен-

тированной на решение задач ударного внедрения ударников в массивные преграды.

✓ В первую группу включаются эксперименты, использующие методику разрезного стержня Гопкинсона-Кольского с образцами материала без обоймы и образцами, заключенными в обоймы различной жесткости.

✓ Ко второй группе относятся эксперименты (в прямой и обращенной постановках) по прониканию жестких ударников с различной формой головной части в мишени из разносопротивляющихся материалов.

□ Результаты численных расчетов внедрения жестких ударников с различной формой головной части в малоупругие разносопротивляющиеся мишени, характеризующие зависимости максимальных перегрузок и финальных глубин проникания ударников в преграду от скорости соударения и прочностных характеристик мишени.

Достоверность полученных результатов подтверждается решением тестовых задач, сопоставлением результатов численных расчетов, полученных по предлагаемой методике, с теоретическими, экспериментальными и численными данными отечественных и зарубежных авторов.

Практическая ценность. Разработанная модель и её программная реализация позволяют расширить класс решаемых задач при исследовании динамических процессов деформирования и разрушения элементов конструкций из разносопротивляющихся материалов. Разработанная методика и программное обеспечение включены в программные комплексы «Динамика-2» и «Upsgod» и используются в НИИМ ННГУ при выполнении хозяйственных работ и госбюджетных тем.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (№ НШ-6391.2006.8, № НШ-3367.2008.8, № НШ-4807.2010.8.); грантов РФФИ (№ 07-01-00257а, № 08-08-97053а, № 10-01-00585а, № 11-08-00545а); ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. ГК № П 1108.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: XII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (Москва-Ярополец, 2006 г.); XIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2006 г.); Международная конференция «XVIII сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды» (Саратов, 2007 г.); Международные конференции «Математическое моделирование в механике

деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» (Санкт-Петербург, 2007, 2009 гг.); Итоговая научная конференция учебно-научного инновационного комплекса «*Модели, методы и программные средства*» (Нижний Новгород, 2007 г.); XLVII Международная конференция «*Актуальные проблемы прочности*» (Нижний Новгород, 2008 г.); Первая Всероссийская конференция «*Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой: НАНОМЕХ-2009*» (Нижний Новгород, 2009 г.); Вторая международная конференция «*Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела*» (Казань, 2009 г.); Тринадцатая Всероссийская научно-практическая конференция «*Актуальные проблемы защиты и безопасности*» (Санкт-Петербург, 2010 г.); X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011 г.).

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликовано 15 работ, основные положения, выносимые на защиту, отражены в работах [1-8], из них [1-4] в изданиях, рекомендуемых ВАК.

Автором развита математическая модель динамического деформирования и разрушения разнородных материалов и уточнены уравнения предельных поверхностей с целью учета влияния угла фазы девиатора напряжений (вида НДС) и эффекта «времени задержки разрушения»; предложена система базовых экспериментов и схема реализации расчетно-экспериментального подхода по оснащению предлагаемой модели константами и материальными функциями; проведена алгоритмизация и программная реализация схемы интегрирования уравнений математической модели в рамках пакетов программ «Динамика-2» и «Upsgod»; проведен анализ результатов решения тестовых и исследовательских задач.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, содержит 135 страниц текста, 94 рисунка, список литературы включает 283 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **Главе 1** описываются основные особенности деформирования и разрушения разнородных материалов, проводится классификация моделей деформирования разнородных сред и обсуждаются существующие численные методы решения задач динамического деформирования и разрушения механики сплошных сред.

Особенностям деформирования и разрушения малопластичных разнородных материалов (§ 1.1) посвящены работы Баженова Ю.М.,

Баклашова И.В., Берга О.Я, Гвоздева А.А, Герасимова А. В., Велданова В.А., Гениева Г.А., Десова А.Е., Евтерева Л.С., Замышляева Б.В., Карпенко Н.И., Лукши Л.К., Малашкина Ю.Н., Попова Н. Н., Яшина А. В., Barpi F., Bazant Z.P., Borst R., Brara A., Brocca M., Carpinteri A., Forquin P., Forrestal M.J., Gary G., Klepaczko J.R., Zaera R. и других авторов. Отмечается влияние вида напряженно-деформированного состояния, наличие пор и включений, микро- и макротрещин, влияние «эффекта обоймы» при локальном интенсивном воздействии, масштабного фактора, времени задержки разрушения, скорости деформирования и других факторов приводящих к качественно различным режимам деформирования и разрушения данных материалов.

В § 1.2. рассмотрены основные подходы к формулировке математических моделей разносопротивляющихся сред, которые, условно, можно отнести к одной из следующих трех групп.

К *первой группе* относятся модели линейно-упругой разносопротивляющейся среды (т.н. соотношения разномодульной теории упругости). Данный подход нашел своё отражение в работах Амбарцумяна С.А., Джонса Р. М., Панферова В.М., Пахомова Б.М., Табаддора Ф., Хачатрян А. А., Шапира Г.С. и других.

Во *вторую группу* входят модели, при формулировке которых используются потенциальные функции и/или инвариантные характеристики тензоров напряжений и деформаций. Предлагаются обобщения для нелинейного поведения разносопротивляющихся сред в работах Гасилова В.А., Головина М.В., Золочевского А.А., Ломакина Е.В., Макеева А.Ф., Матченко Н.М., Мясникова В.П., Овчинникова И.Г., Олейникова А.И., Панферова В.М., Пергамента А.Х., Толоконникова Л.А., Трещева А.А., Туровцева Г.В., Цвелодуба И.Ю. и других.

В задачах динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся материалов определенными преимуществами обладают математические модели *третьей группы*, представляющие собой определяющие уравнения типа дифференциальных уравнений теории упруго-пластического течения. Ключевым элементом в данных моделях является формулировка уравнений предельных поверхностей (текучести, разрушения, пластического потенциала), законов течения и выбор схемы упрочне-

ния. Данный подход к построению определяющих соотношений поведения разносопротивляющихся сред нашел отражение в работах Гениева Г.А., Драгона А., Евтерева Л.С., Замышляева Б.В., Мруза З., Ставрогина А.Н., Carol I., Curran D.R., Fossum A.F., Foster C.D., Gran J., Grassl P., Lopez C.M., Paranikolaou V.K., Park H., Riedel W., Seaman L. и других авторов.

В § 1.3 кратко обсуждаются численные методы решения задач динамического деформирования и разрушения механики сплошных сред, основанные на методах конечного элемента (МКЭ) и конечных разностей (МКР) и использующие переменные Эйлера, Лагранжа или схемы совместного эйлерово-лагранжева подхода для решения задач механики сплошной среды.

Развитию этих методов посвящены работы Аптукова В.Н., Баженова В.Г., Белова Н.Н., Бураго Н.Г., Герасимова А. В., Глазырина В. П., Годунова С.К., Гулидова А.И., Зелепугина С. А., Кукуджанова В.Н., Куликовского А.Г., Мержиевского Л.А., Рузанова А.И., Садовского В. М., Садырина А.И., Фомина В.М., Югова Н.Т. и многих других.

В Главе 2 формулируется разрешающая система уравнений, приводятся соотношения динамического деформирования и разрушения малопластичных разносопротивляющихся сред и постановка начально-краевых задач ударного взаимодействия деформируемых тел.

В § 2.1 представлены уравнения неразрывности, движения и баланса механической энергии в предположении адиабатичности процесса деформирования:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \bar{u} = 0; \quad \frac{d\bar{u}}{dt} - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} \hat{\sigma} = 0; \quad \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{1}{\rho} (\hat{\sigma} : \operatorname{grad} \bar{u}|_S) = 0 \quad (1)$$

где t - время; ρ - плотность; $\bar{u} = (u_1; u_2; u_3)$ - вектор массовой скорости; ε - удельная внутренняя энергия; $\hat{\sigma}$ - тензор напряжений $\|\sigma_{ij}\|$.

В § 2.2 формулируются соотношения модели динамического деформирования и разрушения малопластичных разносопротивляющихся сред, описывающие различные режимы поведения материала. На рис. 1 приведена схема диаграммы деформирования разносопротивляющегося материала и отмечены четыре условных режима деформирования: упругий (**A**) и упругопластический (**B**), неравновесной релаксации напряжений (**BC**) и дефор-

мирования фрагментированного материала (С). Кинетика параметров состояния материала в указанных стадиях и наступление этих режимов, определяется всей историей деформирования материала.

Хорошую аппроксимацию упругопластического участка диаграммы деформирования материалов типа бетонов дает зависимость:

$$\sigma_{Tc}(I, e_i, \varphi) = \sigma_{Tc}^0(I, \varphi) + 3G \frac{C_p(e_i - e_{i0})}{C_p + e_i - e_{i0}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{Tc}, \sigma_{Tc}^0$ – текущий и начальный пределы упругости (интенсивности напряжений), e_{i0}, e_i – начальная и текущая интенсивности деформаций, C_p – константа аппроксимации диаграммы деформирования. Ниспадающий участок диаграммы деформирования определяется скоростью протекания процесса релаксации напряжений.

Зона упругого поведения материала, деформирование в которой описывается обобщенным законом Гука, ограничивается поверхностью текучести, трансформация которой при упругопластическом деформировании описывается следующим уравнением:

$$F_p = \tilde{\sigma}_i - \left(A_p - \frac{B_p \tilde{I}}{1 - \gamma B_p \tilde{I}} \right) \beta(\varphi) q(\omega, \vartheta) = 0, \quad (3)$$

которое используется в качестве пластического потенциала при ассоциированном законе течения. Поверхность разрушения представляется в виде:

$$F_f(\sigma_{ij}, \dot{e}) = \tilde{\sigma}_i^2 + \frac{C_f}{f(\varphi)} \tilde{\sigma}_i + B_f \tilde{I} - A_f = 0, \quad (4)$$

Здесь $\tilde{I} = \sigma_{ij} \delta_{ij} / \sigma_c$, $\tilde{\sigma}_i = \sqrt{3/2 \cdot \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} / \sigma_c$, σ_c – предел прочности при одноосном сжатии; $q(\omega, \vartheta)$ – неубывающая функция упрочнения, зависящая от параметров упрочнения ϑ и поврежденности ω ; A_p, B_p, γ и A_f, B_f, C_f – параметры поверхностей (3) и (4) соответственно; $\beta(\varphi)$ и $f(\varphi)$ функции влияния

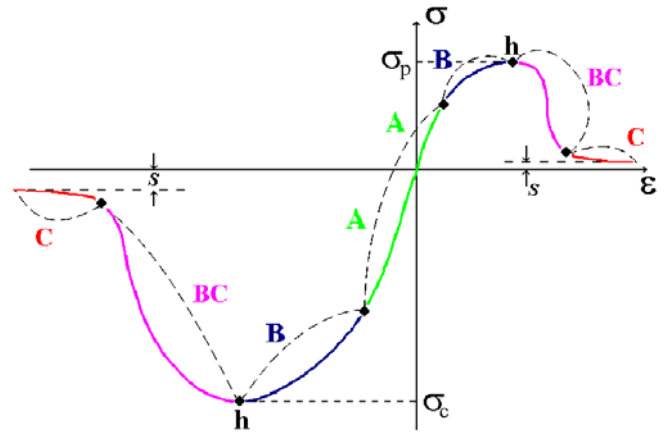


Рис. 1

угла фазы девиатора напряжений φ , определяемого выражением $\cos(3\varphi) = 13,5 \cdot I_3' / \sigma_i^3$, I_3' – третий инвариант девиатора напряжений.

Параметры $A_p, B_p, \gamma, A_f, B_f, C_f$ определяются через экспериментальные данные о пределах прочности при одноосном сжатии σ_c , одноосном растяжении σ_p и двухосном сжатии σ_{cc} , которые, в свою очередь, являются функциями скорости деформаций $\dot{\epsilon}$.

Сечение поверхностей пластичности (начальной F_p^0 при $\omega = 0$ и текущей F_p) и разрушения F_f при фиксированном угле φ в области малых давлений представлено на рис. 2. Рис. 3 характеризует взаимное расположение

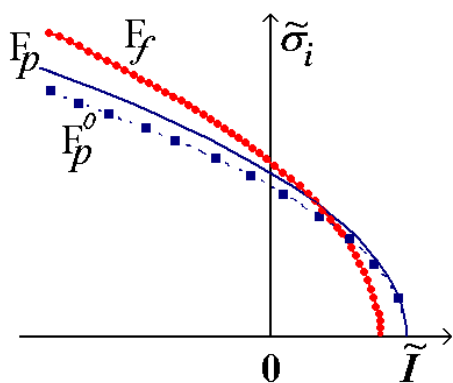


Рис. 2

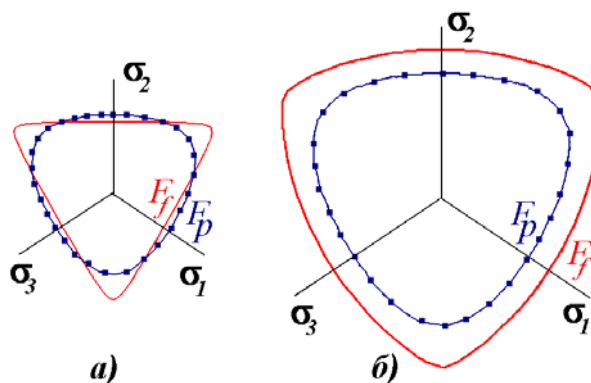


Рис. 3

поверхностей F_p и F_f при сечении их девиаторной плоскостью для положительных (рис. 3а) и отрицательных (рис. 3б) значений среднего напряжения.

Сплошными линиями на рис. 4 представлена аппроксимация поверхностью разрушения (4) экспериментальных данных¹ (круглые и треугольные маркеры) для двух предельных углов φ (меридианы растяжения и сжатия). Треугольные маркеры соответствуют меридиану растяжения $\cos(3\varphi) = 1$, а круглые – меридиану сжатия при $\cos(3\varphi) = -1$.

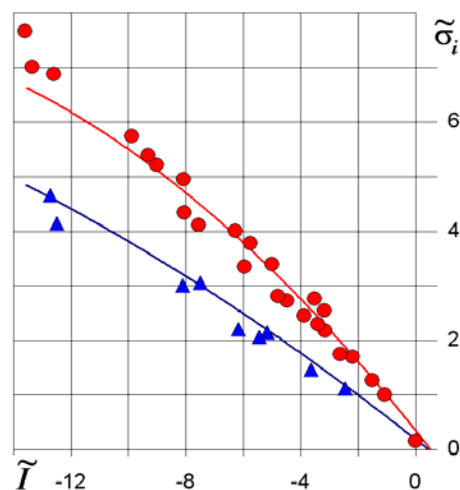


Рис. 4

Функции $\beta(\varphi)$ и $f(\varphi)$ строятся как интерполянты для промежуточ-

¹ Kupfer H., Hilsdorf H.K., Rusch H.J. Behavior of concrete under biaxial stresses // American Concrete Institute Journal. 1969. Vol. 66. P. 656-666.

ных значений угла φ , исходя из экспериментальных данных о прочности материала для меридианов растяжения и сжатия.

Процесс упругопластического деформирования сопровождается накоплением повреждений и упрочнением материала. Кинетическое уравнение накопления повреждений и критерий разрушения имеют вид:

$$\dot{\omega} = \dot{\varrho} / \mathcal{G}^*(\sigma_{ij}), \quad \int_0^{t^*} \dot{\omega} dt = 1 \quad (5)$$

где $\dot{\varrho} = \sqrt{2/3 \dot{\epsilon}'_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij}}$, а $\mathcal{G}^* = \int_0^{t^*} \sqrt{2/3 \dot{\epsilon}'_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij}} dt$ – значение параметра Отквиста при достижении предела прочности при текущем виде НДС.

При достижении напряженно–деформированным состоянием поверхности разрушения (4) начинается процесс фрагментирования материала и релаксации напряжений. Скорость релаксации напряжений определяется экспериментально на основе времени задержки разрушения для характерного размера разрушений. На рис. 5. варианты ниспадающей (неравновесной) ветви диаграммы деформирования соответствуют малой (1), средней (2) и высокой (3) скорости протекания процесса релаксации напряжений.

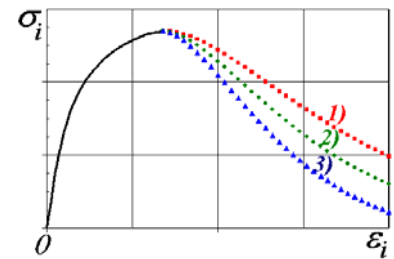


Рис. 5

Поведение полностью разрушенного материала описывается моделью течения упругопластической среды с нулевым сопротивлением всестороннему растяжению²:

$$F_{pf}(\sigma_{ij}, I, \dot{\epsilon}) = \tilde{\sigma}_i + \frac{B_{pf} \tilde{I}}{1 - \gamma_f B_{pf} \tilde{I}} = 0, \quad (6)$$

где B_{pf}, γ_f – экспериментально определяемые параметры.

В § 2.3 приводятся уравнения упругопластического деформирования для традиционных конструкционных материалов (ударники и элементы экспериментальных сборок), которые при интенсивных динамических нагрузках могут испытывать упругопластическое деформирование. Тензор скоростей деформаций раскладывается на упругую и пластическую состав-

² Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред / М.: Наука. 1990. 215 с.

ляющие, для учета изменения тензора напряжений за счёт вращения материальной частицы, используется производная Яумана. Уравнение поверхности текучести принимается в форме Мизеса, составляющие тензора скорости пластических деформаций определяются ассоциированным законом течения.

В § 2.4 описываются постановки начально-краевых задач для системы уравнений (1).

В Главе 3 излагается численная реализация схемы интегрирования разрешающей системы уравнений, приводятся результаты тестирования модели динамического деформирования и разрушения разнсопротивляющихся сред.

В § 3.1 кратко описаны основные соотношения модифицированного метода Годунова С. К. с использованием подвижных лагранжево-эйлеровых сеток³ и схема на основе вариационно-разностного метода в переменных Лагранжа⁴. Данные методики численного решения реализованы в виде ППП «Upsgod» и «Динамика-2» в НИИ механики Нижегородского университета.

В § 3.2 представлены разностные соотношения модели динамического деформирования и разрушения разнсопротивляющихся сред и результаты исследования влияния вариации параметров модели (2)–(6) и скорости соударения на характеристики решения тестовых задач динамического деформирования и разрушения массивных бетонных мишеней при внедрении жестких ударников [5].

Наиболее информативной для исследования модели является начальная стадия внедрения, соответствующая погружению головной части снаряда в мишень – здесь происходит интенсивный рост силы сопротивления внедрению и формируются характерные зоны разрушений. В этой связи рассмотрен процесс деформирования и разрушения бетонной мишени при внедрении жесткого ударника с оживальной головной частью по нормали к

³ Абузьяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред //ЖВМиМФ. 2000. Т.40. №6. С.940-953.

⁴ Баженов В.Г., Зефирова 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.мод-е. 2000. Т. 12. № 6. С. 67-72.

мишени на глубину $\bar{l} = 1$. Здесь \bar{l} – отношение глубины внедрения ударника к длине оживала. Исследуется влияние времени задержки разрушения $\tau_{з.р.}$, предела прочности σ_c , параметра хрупкости (σ_c / σ_p) и скорости удара на характеристики процесса внедрения ударника (величина перегрузки, глубина внедрения), объём и характер разрушений бетонной мишени.



Расчеты показали, что для данного ударника при скоростях удара 100–600 м/с максимум перегрузок достигается при $\bar{l} = 2/3$ (рис. 6) и наблюдается близкий к линейному рост перегрузок (рис. 7) и глубины внедрения в зависимости от скорости удара. Увеличение скорости удара, и, следовательно, уменьшение времени индентирования на одинаковую глубину $\bar{l} = 1$, приводит к уменьшению объёма разрушений бетона, т.к. полностью поврежденный материал (с предельным уровнем $\omega = 1$) не успевает разрушиться – влияет эффект «задержки времени разрушения».

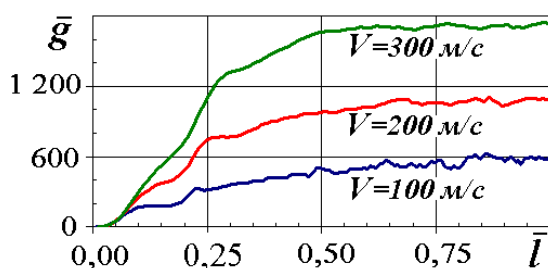


Рис. 6

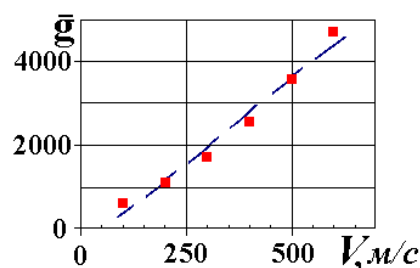


Рис. 7

При одинаковой скорости удара уменьшение времени задержки разрушения $\tau_{з.р.}$ существенно увеличивает объём разрушений бетона (для одинаковой глубины внедрения), в основном за счет уменьшения объёма материала бетона, находящегося в режиме релаксации напряжений, а максимум величины перегрузки \bar{g} при этом снижается.

Увеличение предела прочности σ_c повышает величину перегрузок в ударнике и уменьшает глубину внедрения и объём разрушений в бетоне (качественно, однако, картина разрушений близка).

Сравнение расчетов тестовых задач внедрения жесткого ударника в бетонную мишень при использовании переменных Эйлера и Лагранжа показало, что результаты расчетов хорошо согласуются между собой.

В Главе 4 в рамках расчетно–экспериментального подхода излагается схема определения констант и материальных функций математической модели (§ 4.1). Путём комплексного анализа и согласования результатов базовых натуральных и вычислительных экспериментов уточняется диаграмма деформирования материала и корректируются параметры математической модели.

Основой первой группы базовых экспериментов является методика разрезного стержня Гопкинсона–Кольско-го. В качестве иллюстрации схемы определения констант и материальных функций приводятся [3] результаты сопоставления данных компьютерного моделирования с экспериментальными

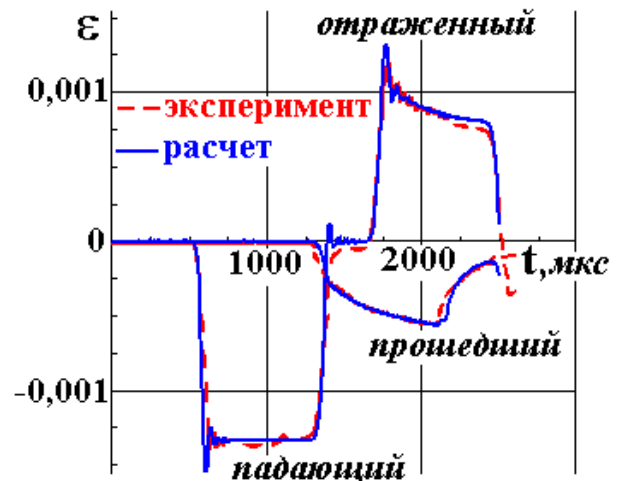


Рис. 8

данными⁵ по деформированию образца бетона ($G = 15 \text{ ГПа}$, $K = 20 \text{ ГПа}$) заключенного в обойму. Совпадение экспериментального и расчетного импульсов деформаций в мерных стержнях (рис. 8) достигнуто при $C_p = 0,003$, $\sigma_T = 160 \text{ МПа}$, $\sigma_c = 250 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 25 \text{ МПа}$, $\sigma_{cc} = 290 \text{ МПа}$, $\tau_{з.р.} = 300 \text{ мкс}$.

На рис. 9 приведены зависимости интенсивности напряжений от среднего напряжения в образце. Точками a, b, c, d отделены основные временные этапы динамического деформирования и разрушения образца бетона. Этап $(0 - a)$ соответствует режиму упругого и упругопластического деформирования, затем происходит разрушение и последующая релаксация напряжений $(a - b)$, этап $(b - c)$ соответствует деформированию разрушенного материала, затем происходит разгрузка $(c - d)$.

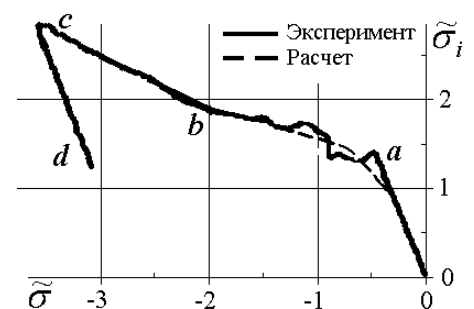


Рис. 9

Немонотонность экспериментальной кривой рис. 9 на участке $(a - b)$ коррелирует с осцилляциями деформаций в отраженном импульсе рис. 8,

⁵ Forquin P., Gary G., Gatingt F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain // Int. J. Impact Eng. 35 (2008) 425-446.

представленных в увеличенном виде на рис. 10. Данные осцилляции можно связать с дискретностью актов разрушения натурального образца во времени, а их продолжительность характеризует величину времени задержки разрушения $\tau_{з.р.}$.

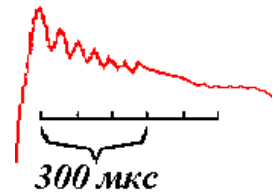


Рис. 10

В рамках второй группы базовых экспериментов, приводятся [1,2,4,6,7] результаты анализа и согласования численных расчетов с экспериментальными данными по внедрению жестких ударников в мишени из бетона и гранита в прямой и обращенной постановке.

В обращенном эксперименте мишень с цилиндрическим образцом бетона наносила удар по неподвижному ударнику, соединенному с мерным стержнем. На рис. 11 приведено сравнение расчетной силы сопротивления внедрению ударника с оживальной головной частью при скорости удара 85 м/с в мишень бетона с экспериментальными данными*. Численный расчет останавливался, когда начинало сказываться влияние конечности размеров контейнера. Аналогичные результаты получены при внедрении ударника со сфероконическим оголовком для скоростей удара 212 м/с и 217 м/с.

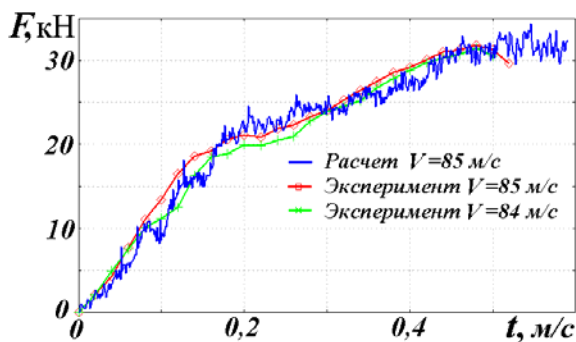


Рис. 11

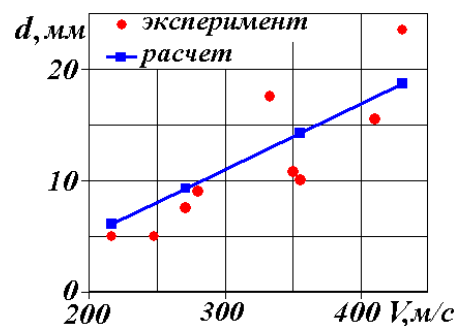


Рис. 12

Были выполнены численные расчеты по удару шариками из стали ШХ15 твердостью 62–64 НРС массой 28,2 г в гранитные мишени. На рис. 12. приведено сравнение расчетных (при скоростях удара 220, 270, 355, и 430 м/с) и экспериментальных* глубин d кратера при различных скоростях соударения. Глубина кратера в экспериментах определялась реконструкцией фрагментов мишени. Упругие константы гранита $K = 26,78 \text{ ГПа}$, $G = 18,44 \text{ ГПа}$ получены экспериментально, а параметры $\sigma_T = 190 \text{ МПа}$, $C_p = 0,005$, $\sigma_c = 460 \text{ МПа}$, $\sigma_p / \sigma_c = 0,07$, $\sigma_{cc} / \sigma_c = 1,15$ задавались путем сог-

* Эксперименты выполнены в НИИ механики ННГУ под руководством Брагова А. М.

ласования данных эксперимента и расчета для скорости $V_{\text{удара}} = 220 \text{ м/с}$.

В § 4.2 проведена [2,4,7] верификация модели путем сравнения результатов компьютерного моделирования с данными экспериментов, эмпирическими зависимостями и численными расчетами других авторов.

Результаты численных расчетов по прониканию жестких ударников массой около 13 кг с оживальной формой головной части при скоростях удара 200-460 м/с в бетонные мишени разной прочности (динамические пределы $\sigma_c = 165 \text{ МПа}$ и $\sigma_c = 360 \text{ МПа}$) в сравнении с данными натуральных экспериментов⁶ приведены на рис. 13–14. Рис. 13 иллюстрирует хорошее соответствие расчетных величин перегрузок \bar{g} ударников при внедрении в бетон меньшей (кривая 1) и большей прочности (кривая 2) с экспериментальными данными.

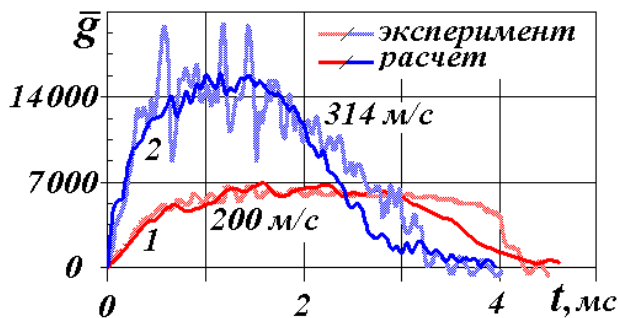


Рис. 13

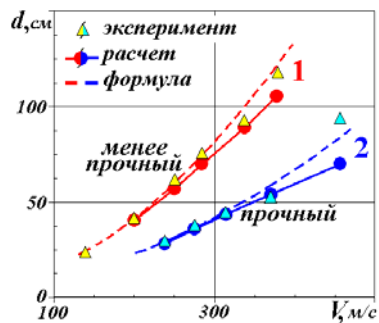


Рис. 14

Удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных значений финальных глубин d проникания снарядов в бетон меньшей прочности (кривая 1) и в бетон большей прочности (кривая 2), представлено на рис. 14. Пунктирной линией обозначена глубина проникания по эмпирической формуле Форрестола⁶.

Для скоростей удара 100–300 м/с при проникании в массив мрамора ударника массой около 300 кг, получено (рис. 15) хорошее качественное и количественное совпадение финальных глубин проникания \bar{d} (отнесенных к длине ударника) и максимальных значений перегрузки \bar{g} при численных расчетах и на основе эмпирических

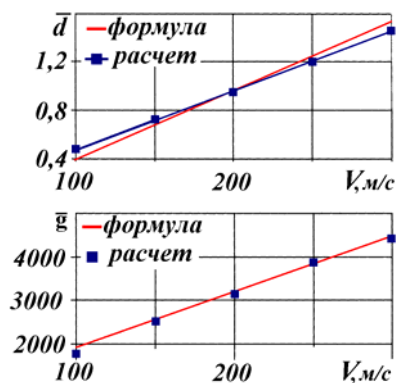


Рис. 15

⁶ Forrestal M. J., Frew D. J., Hickerson J. P., Rohwer T. A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements // Int. J. Impact. Eng. 28 (2003) 479–497.

формул⁷. Механические характеристики для оснащения расчетной модели мрамора были взяты из работ^{8,9}.

В § 4.3 представлены [8] результаты численного расчета и анализ прочности модели взрывозащитной камеры (ВЗК), представляющей собой трехслойный цилиндрический контейнер (внутренний радиус 70 см). Внешний и внутренний слои ВЗК (толщиной 2 и 1,4 см) выполнены из стали 20, а средний слой (толщиной 8 см) из бетона. Заряд ТНТ сферической формы массой 11,4 кг размещается на оси симметрии в центре камеры.

Проведено несколько вариантов расчета при $\sigma_c = 20 \text{ МПа}$, $\sigma_c = 40 \text{ МПа}$ и $\sigma_c = 60 \text{ МПа}$, а параметр $\xi = \sigma_p / \sigma_c$ варьировался в пределах 0,12–0,17.

Рис. 16 иллюстрирует влияние параметра ξ на амплитуду окружных деформаций внешней поверхности камеры на оси симметрии при $\sigma_c = 40 \text{ МПа}$. Вариация параметров ξ и σ_c позволяет приблизить расчетный максимум окружных деформаций ε_θ к экспериментально замеренным значениям, составляющих 0,38 % [8].

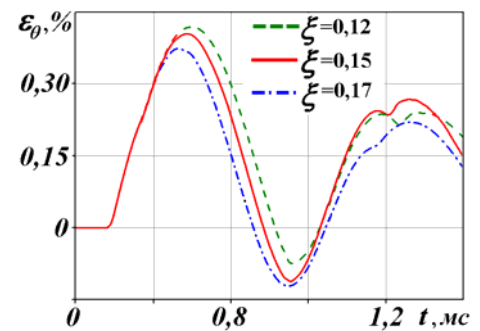


Рис. 16

Результаты анализа данных численных расчетов [8] позволяют выделить две различные составляющие процесса разрушения. Во-первых, это разрушения от действия растягивающих окружных напряжений с образованием жестких фрагментов бетона, препятствующих сближению внутреннего и внешнего слоев камеры. Вторая составляющая разрушения, приводящая к множественной фрагментации бетона в зоне разрушения, условно соответствует разрушению от действия сжимающих напряжений. Наблюдается сложное взаимодействие указанных двух типов разрушения и их разнонаправленное влияние на размер и локализацию зон разрушения в слое бетона.

⁷ Young C.W. Penetration Equations // Contractor Report, SAND 97-2426, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.Mex., October 1997. 24 p.

⁸ Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. Ф., Симаков Г. В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. 531 с.

⁹ Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2-х тт. М.: Физматлит. 2004. Т. 1. 832 с. Т. 2. 656 с.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

□ Развита математическая модель, описывающая основные стадии динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся малопластичных сред типа бетона, скальных и полускальных горных пород при интенсивных ударных воздействиях. Соотношения основаны на законах течения упругопластической среды, в которых уравнения пластического потенциала (поверхность текучести), поверхность разрушения и поверхность течения фрагментированного (разрушенного) материала зависят от среднего напряжения, интенсивности тензора напряжений, угла фазы девиатора напряжений (вида НДС), скорости деформаций и параметра поврежденности.

□ Разработаны процедуры оснащения математической модели динамического деформирования и разрушения разносопротивляющихся материалов константами и материальными функциями. Для предложенной системы базовых экспериментов разработаны схемы уточнения диаграммы деформирования, параметров поверхности разрушения и поверхностей текучести при различных видах НДС и скорости деформирования путем согласования результатов базовых натуральных и вычислительных экспериментов.

□ Проведены численные исследовательские расчеты по изучению закономерностей деформирования и разрушения преград из бетона и твердых горных пород при интенсивных ударных воздействиях:

✓ Выявлены закономерности изменения пиковых величин перегрузок и финальных глубин проникания при внедрении жестких ударников в малопластичные разносопротивляющиеся мишени в зависимости от скорости удара и прочностных характеристик преград, согласующиеся с данными натуральных экспериментов и эмпирическими зависимостями.

✓ Проведен анализ деформирования взрывозащитной камеры (ВЗК) и показано, что возможны разрушения слоя бетона от действия растягивающих окружных напряжений с образованием жестких фрагментов, препятствующих сближению внутреннего и внешнего слоев ВЗК, и разрушения от действия радиальных сжимающих напряжений, приводящие к множественной фрагментации бетона. Показано, что из-

менение отношения предела прочности бетона на растяжение к пределу прочности бетона на сжатие, оказывает существенное влияние на преобладающий тип разрушения и характеристики взрывостойкости ВЗК.

Автор считает своим долгом поблагодарить сотрудников НИИ механики ННГУ Зефирова С.В., Крылова С.В. и Цветкову Е.В. за помощь в освоении программных средств и проведении численных расчетов, а Брагова А.М. и Баландина В.В. за предоставленные экспериментальные данные.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Садырин А.И., Батарин А.Б., Крылов С.В., Пирогов С.А. Динамическое внедрение жестких ударников в бетонные преграды //Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: из-во Нижегородского ун-та. 2008. № 4. С. 112-116.
2. Садырин А.И., Крылов С.В., Пирогов С.А. Моделирование ударного проникания жестких ударников в бетонные преграды //Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Вып. 1 (59). – М.: РАН. 2009. С. 10-14.
3. Садырин А.И., Зефирова С.В., Пирогов С.А. Компьютерное моделирование деформирования образца бетона, заключенного в обойму //Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Вып. 71. – Нижний Новгород: изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2009. С. 122-128.
4. Садырин А.И., Пирогов С.А. Внедрение жестких ударников в малопластичные хрупко разрушающиеся среды //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Часть 4. С. 1747-1749.

В других изданиях:

5. Пирогов С.А., Садырин А.И. Модель динамического поведения малопластичных разносопротивляющихся сред //Труды итоговой научной

- конференции учебно-научного инновационного комплекса «Модели, методы и программные средства» (Нижний Новгород, 27-30 ноября 2007 г.). – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2007. С. 318-321.
6. Садырин А.И., Крылов С.В., Пирогов С.А. Феноменологическая модель структурно неоднородных сред //Первая Всероссийская конференция «Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой: НАНОМЕХ-2009». Тезисы докладов. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ. 2009. С. 100-101.
7. Садырин А.И., Зефилов С.В., Крылов С.В., Пирогов С.А. Модель динамического поведения хрупких структурно неоднородных сред //Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела. Труды Второй международной конференции. – Казань: Казан. гос. ун-т. 2009. С. 313-316.
8. Садырин А.И., Зефилов С.В., Пирогов С.А. Анализ прочности модели взрывозащитной камеры //Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2010. Вып. 3-4. С. 80-84.

Подписано в печать 26.01.2012. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 30. Тираж 100.

Отпечатано в Центре цифровой печати
Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.