

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

*Колотилов Вадим Алексеевич*

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно—квалификационной  
работы

(диссертации)

*«Исследование распространения импульса в средах переменной плотности»*

Направление подготовки:

01.06.01 — Математика и механика

Направленность подготовки: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Научный руководитель

*академик РАН,*

*научный руководитель института*

*Фомин Василий Михайлович*

Новосибирск 2019

**Актуальность исследования.** Гетерогенные системы – это неоднородные системы, состоящие из однородных частей, разделенных поверхностью раздела сред. Существует большое количество разных неоднородных материалов, имеющих большое приложение в различных областях промышленности.

Разработка новых материалов требует исследований свойств ещё на этапе проектирования. Развитие технологий и методов позволяет строить современные математические модели, что влечёт за собой развитие математических моделей для описания подобных структур. Например, композиционные материалы с заданными свойствами для решения конкретной прикладной проблемы. Важным фактором в таких задачах является учёт микроструктуры гетерогенной системы.

Другой проблемой является потребность в моделировании распространения возмущений в гетерогенной системе, её влияние на микроструктуру, и локализация перехода между границей раздела фаз.

Одной из задач в этой области является исследование распространения импульса вследствие нагружения гетерогенной среды, состоящей из твёрдой и жидкой фазы, в которой возможны последующие превращения одного состояния в другое. Например, задача о распространении волн нагрузки в асфальте, предварительно насыщенном водой в холодный период.

Для решения подобных задач применяются высокоточные разностные схемы сквозного счёта, способные выделывать контактные разрывы и локализовать волны сжатия и ударные волны в потоках из нескольких сред. Существует класс разностных схем, в которых повышенный порядок аппроксимации на гладких решениях и монотонность достигались за счёт нелинейной коррекции потоков. Основные классы таких схем: MUSCL-схемы, TVD-схемы, NED-схемы, WENO-схемы, Кабаре-схемы и схемы разрывного метода Галеркина. Последние три схемы пользуются популярностью в работе.

Одним из наименее изученных методов является схема Кабаре. Кабаре-схемы являются явными и не требуют итерационных процедур в процессе построения алгоритма. Схемы универсальны и без настроечных параметров, могут быть использованы для локализации ударных волн, при этом фронты этих волн, независимо от интенсивности, размазываются на одну расчетную ячейку. К недостаткам следует отнести необходимость следить за устойчивостью схемы, ввиду явного шаблона и использование дополнительных коррекций переменных для сохранения высокого порядка точности. Следует отметить и недостаточную математическую строгость данного метода для систем гиперболических уравнений, однако привлекательность вышеперечисленных достоинств делает как развитие метода, так и обобщение метода на задачи механики деформируемого твердого тела и гидро-газодинамики, актуальной задачей.

Для решения задач о распространении импульса в гетерогенной среде существует два основных направления решения:

- 1) связывание решателей каждой из фаз (например, совместные Лагранжево-Эйлеровы подходы);
- 2) совместное решение в единой структуре (например, процедура гомогенизации среды)

Первый подход увеличивает алгоритмическую сложность, поскольку включает два решателя, а с включением дополнительных свойств среды, например, вязкоупругости, сложность существенно возрастает. Его применимость необходима в задачах с сильно различающимися свойствами фаз, например, в задачах фильтрации.

Второй подход предполагает исследование гомогенизированной среды с учетом всех входящих в нее фаз. Учитывая интерес в использовании преимуществ численных методов высокого порядка, главная трудность заключается в представлении деформаций и напряжений, описываемых Лагранжевым способом, в формулировке Эйлера и необходимости к точному

описанию разрывов. Преимущество второго подхода в том, что уравнение состояния предлагается в форме, позволяющей разделить энергию на «гидродинамические» и «упругие» части, совместимые с неконсервативной моделью раздела.

Данная работа посвящена развитию численного метода конечных разностей Кабаре в приложении к распространению возмущений в гетерогенных системах. Произведена попытка построения общего алгоритма для решения задач из разных областей механики.

**Цель работы** – развитие численного метода Кабаре в приложении задач распространения ударных волн в гетерогенных системах. Включает в себя следующие задачи:

1. Применение двуслойной по времени схемы Кабаре в задачах ударно-волнового нагружения материалов. Гидродинамическая постановка задачи. Верификация метода и валидация. Построение ударных адиабат.
2. Развитие численного метода Кабаре в приложении задач, описываемых гиперболическими системами уравнений как с полным, так и с неполным набором инвариантов. Устранение осцилляций в существующем варианте и распространение теоремы о монотонности схемы Кабаре на случай полной газодинамической системы уравнений. Верификация численного метода.
3. Применение метода в задаче моделирования распространения ударных волн в газодинамическом канале с проницаемыми и непроницаемыми преградами в двумерной постановке.

**Степень разработанности темы исследования.** Выполнены все поставленные задачи. Данные, полученные в разных сериях экспериментов, дополняют друг друга и дают целостную картину изучаемого явления.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является численный метод Кабаре, его возможности и предел применимости. Изучены

свойства метода, рассмотрен математически строгий вариант схемы с процедурой монотонизации потоковых переменных. **Предметом** исследования являются приложения, где настоящий метод был рассмотрен: задача ударно-волнового нагружения среды в гидродинамической одномерной постановке и задача о распространении ударной волны в канале в двумерной постановке, наполненном смесью газов, включающий в себя как проницаемые, так и непроницаемые преграды.

**Научная новизна.** Разработан и развит численный метод высокого порядка точности для решения систем гиперболических уравнений. Подтверждена высокая точность алгоритма. Разработаны программные модули для расчета одномерных и двумерных задач. Показана прикладная значимость алгоритма на примере моделирования ударных волн в прямоугольных каналах с проницаемыми и непроницаемыми преградами для проектировщиков заслонов в горных выработках.

#### **Методология и методы исследования.**

Изначально рассмотрен алгоритм схемы Кабаре, аппроксимирующей уравнение со знакопеременным характеристическим полем. Теорема, доказанная в линейном случае, коррекция потоковых переменных и процедура монотонизации потоков были перенесены и адаптированы на квазилинейный случай системы гиперболических уравнений. В последствии была проведена верификация метода на простых задачах газовой динамики, имеющих аналитическое решение: задача об ударной трубе, задачи Римана.

После верификации численный метод был распространен на задачи распространения ударных волн в гетерогенных средах.

Алгоритм схемы Кабаре является явным конечно-разностным методом. Реализация метода осуществлялась на языке программирования Python. Для проверки и подтверждения высокой производительности алгоритма, проводилась конверсия метода на язык C++

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в простом конечно-разностном методе, способном оперативно считать сложные одно- и двумерные задачи в консервативной гиперболической постановке. Другой значимостью является универсальность метода для задач гидродинамики и механики деформируемого твёрдого тела.

Практической ценностью результатов является их высокая валидность, что делает данный алгоритм хорошим дополнением к экспериментальным исследованиям, приводящим к сокращению их количества и высокому прогнозированию результатов.

**Степень достоверности и апробация работы.** Свидетельством достоверности также является представление результатов диссертации на многочисленных российских научных конференциях по теме работы, публикации в рецензируемых научных журналах.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

- Верифицированный алгоритм схемы Кабаре с процедурой монотонизации и коррекции потоков для системы гиперболических уравнений на тестовых задачах
- Результаты по изучению ударно-волнового нагружения гомогенизированной среды в одномерной постановке.
- Результаты по исследованию распространения ударных волн в прямоугольных каналах с проницаемыми и непроницаемыми преградами в двумерной постановке

**Содержание работы:** Диссертация состоит из введения, трёх глав, и заключения.

**Во введении** приведён обзор литературных источников по текущему положению дел в существующих сегодня численных методов в механике. Приводится классификация численных методов на три категории: континуальные, микроструктурные и атомистические. В рамках настоящей работы исследуется только первая категория методов. Приводятся

достоинства и недостатки методов существующих конечных разностей и конечных элементов, и их практическая польза, и применимость. Рассматриваются методы конечных разностей высокого порядка точности, проводится сравнение их, выявление достоинств и недостатков. Проводится их сравнительный анализ на точность решения, быстродействие и производительность.

На основании предоставленных в обзоре результатов делается выбор численного метода. Метод выбирается исходя из следующих критериев: возможность его дальнейшего развития, простота в реализации, универсальность и высокая вариативность в задачах механики. Формируются цели и задачи исследований и делается вывод о месте данной работы.

**В первой главе** приводится описание численного метода и алгоритм. Описывается развитие метода, устранение существующих проблем. Осуществляется верификация метода.

**В п. 1.1** приводится описание выбранной из литобзора схемы высокого порядка точности Кабаре. В качестве базового алгоритма принят вариант, предложенный Головизниным В.М. Приводятся основные достоинства и недостатки метода. Задаётся описание для системы гиперболических уравнений на примере законов газодинамических законов сохранения в одномерном случае. Рассматриваются Лагранжева и Эйлера постановка. Выявляются существующие на данный момент нерешенные проблемы метода.

В п. 1.2 рассматриваются одномерные тестовые задачи системы газодинамических уравнений: задача об ударной трубе, задача Римана о распространении ударных волн и волн разрежения. Демонстрируются проблемы существующего метода и предел применимости. На Рис. 1 представлена реализация задачи об ударной трубе в безразмерном виде. Давление в области слева больше, чем в области справа, в 2 раза. Плотность слева больше, чем справа в 5 раз. Скорости слева и справа равны нулю.

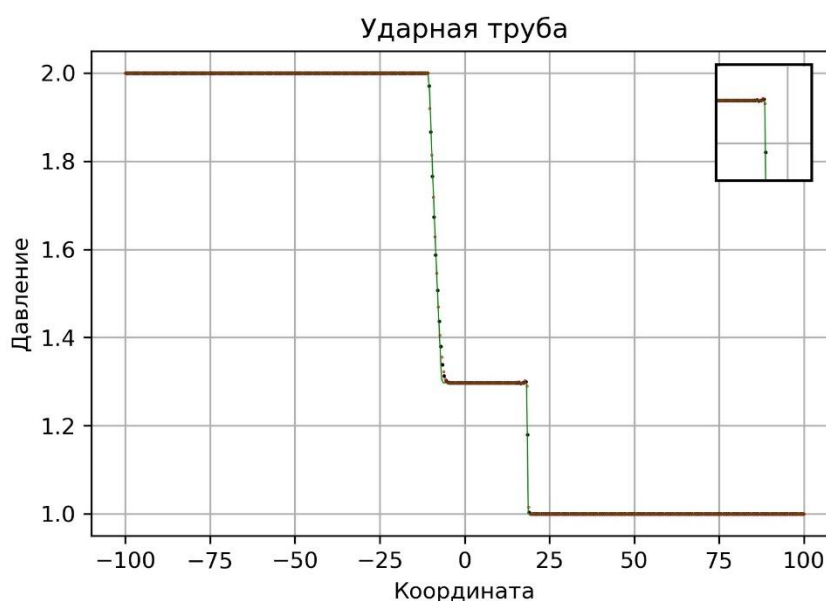


Рис. 1 Результат численного решения для задачи об ударной трубе. Линия — аналитическое решение. Красные точки (мельче) — потоковые переменные, черные точки (крупнее) — консервативные переменные

Видно, что в области за фронтом ударной волны возникает схемная осцилляция. Данная осцилляция устранена процедурами монотонности для систем двух гиперболических уравнений, например, в теории мелкой воды (Рис. 2).



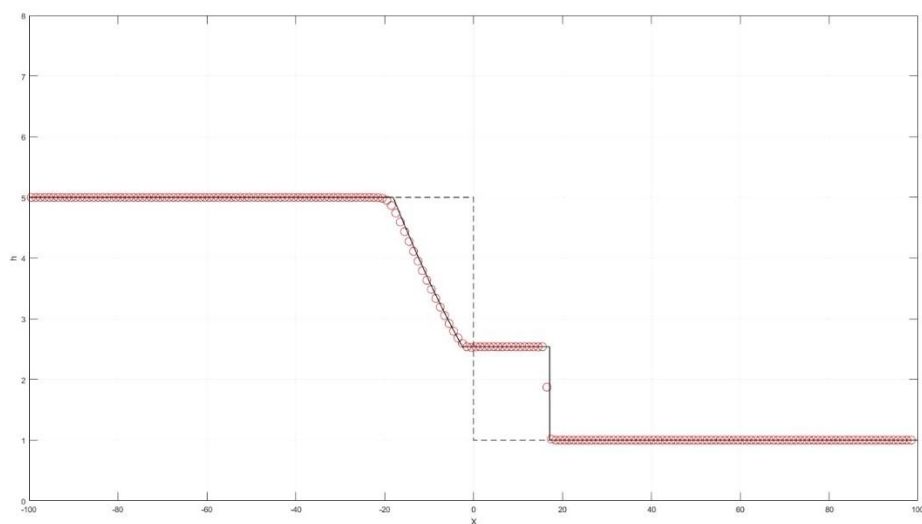


Рис. 2. Результат численного решения задачи о разрушении плотины. Линия – аналитическое решение, пунктирная линия – начальное распределение глубины от координаты, кружочки – консервативные переменные.

На Рис. 3 продемонстрировано, что с увеличением давления в области слева за волной разрежения, при постоянной плотности, наблюдаются схемные осцилляции. Они связаны с тем, что в области образуется сверхзвуковое течение, что для текущего варианта схемы представляется невозможным.

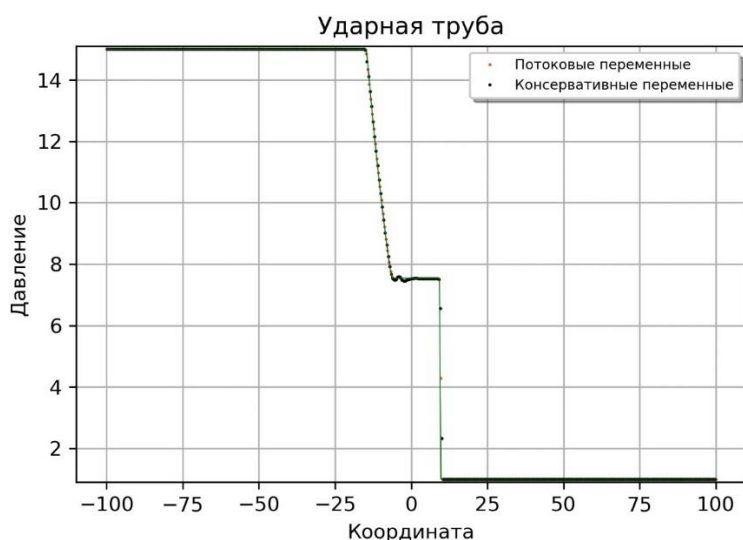


Рис. 3 Результат численного решения для задачи об ударной трубе. Линия – аналитическое решение. Красные точки (мельче) – потоковые переменные, черные точки (крупнее) – консервативные переменные

Расчет проводился при  $P_{\text{слева}} = 15$ ,  $P_{\text{справа}} = 1$ .  $\rho_{\text{слева}} = 1$ ,  $\rho_{\text{справа}} = 1$ ,  $u_{\text{слева}} = u_{\text{справа}} = 0$ . Дальнейшее увеличение давления показало рост осцилляций в

области за волной разрежения. При перепаде давлений в 30 раз задача разваливается.

На Рис. 4 приведены задачи Римана для ударных волн. Показано, что как для случая малых волн, так и для больших, наблюдается схемная осцилляция в областях за фронтами ударных волн.

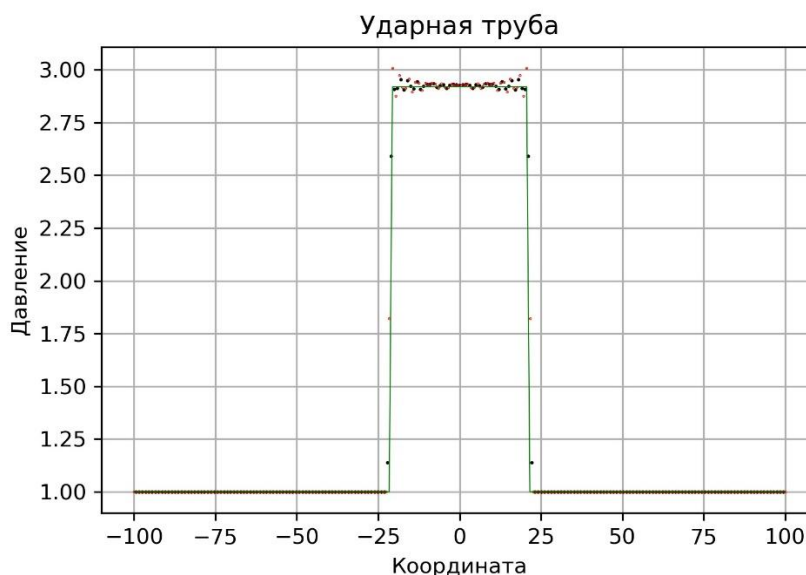


Рис. 4. Задача Римана о распространении двух ударных волн. Линия – аналитическое решение. Красные точки (мельче) – потоковые переменные, черные точки (крупнее) – консервативные переменные

В заключении пункта делается вывод о недостатках метода и предлагаются способы устранения проблемы.

В п.1.3 приводится развитие численного метода Кабаре с добавлением процедур коррекции и монотонизации потоковых переменных. Идея взята на основании доказанной теоремы о монотонности схемы Кабаре для гиперболического уравнения со знакопеременным характеристическим полем. Процедура монотонизации потоков, доказанная для уравнения переноса, выполняется для системы газодинамических законов. На одномерных тестовых задачах проводится сравнение обоих подходов и делается вывод о применимости данных процедур и выполнении законов сохранения. На Рис. 5 представлена реализация задачи об ударной трубе в безразмерном виде.  $P_{\text{слева}} = 2$ ,  $P_{\text{справа}} = 1$ .  $\rho_{\text{слева}} = 5$ ,  $\rho_{\text{справа}} = 1$ ,  $u_{\text{слева}} = u_{\text{справа}} = 0$ .

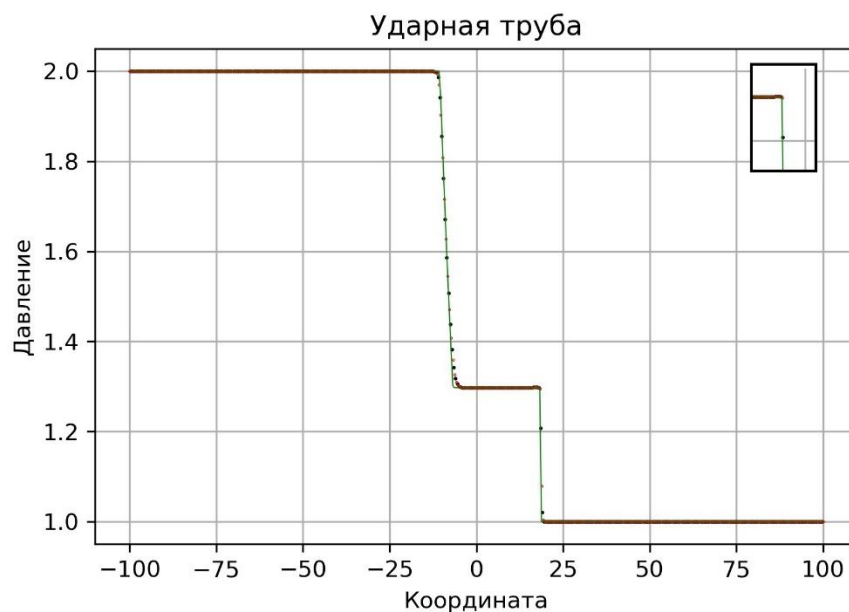


Рис. 5 Результат численного решения для задачи об ударной трубе, с процедурой коррекции потоковых переменных. Линия – аналитическое решение. Красные точки (мельче) – потоковые переменные, черные точки (крупнее) – консервативные переменные.

В сравнении с предыдущим вариантом схемы видно отсутствие осцилляции за фронтом ударной волны (Рис. 6).

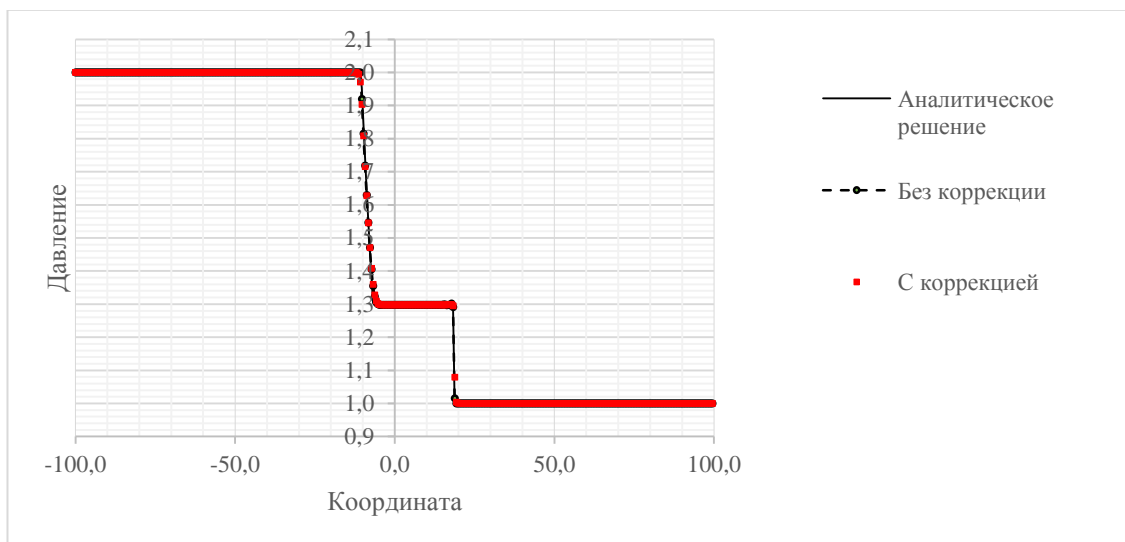


Рис. 6 Сравнительный график численного решения задачи о разрушении плотины. Аналогичное сравнение сделано для задачи Римана Рис. 7

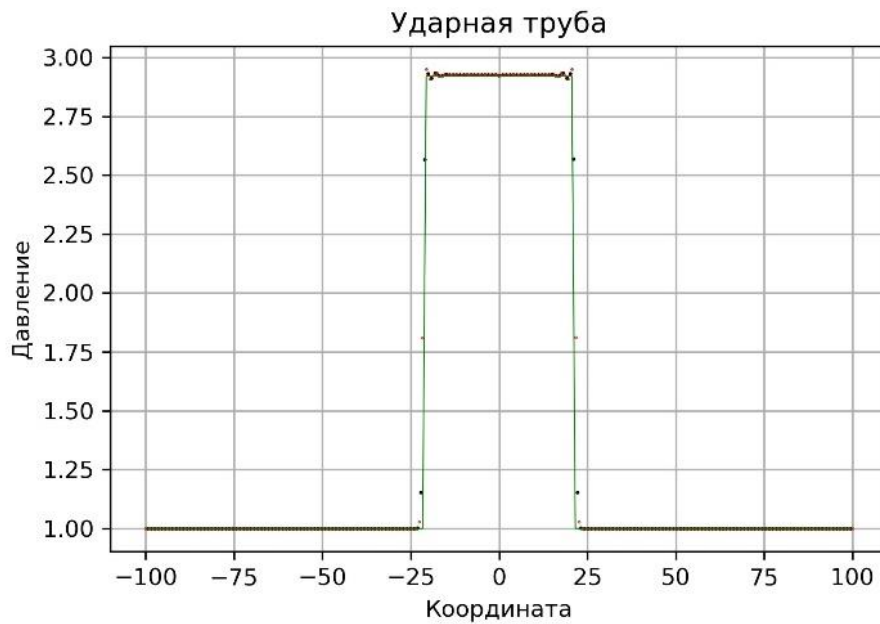


Рис. 7 Задача Римана о распространении двух ударных волн. Линия – аналитическое решение. Красные точки (мельче) – потоковые переменные, черные точки (крупнее) – консервативные переменные

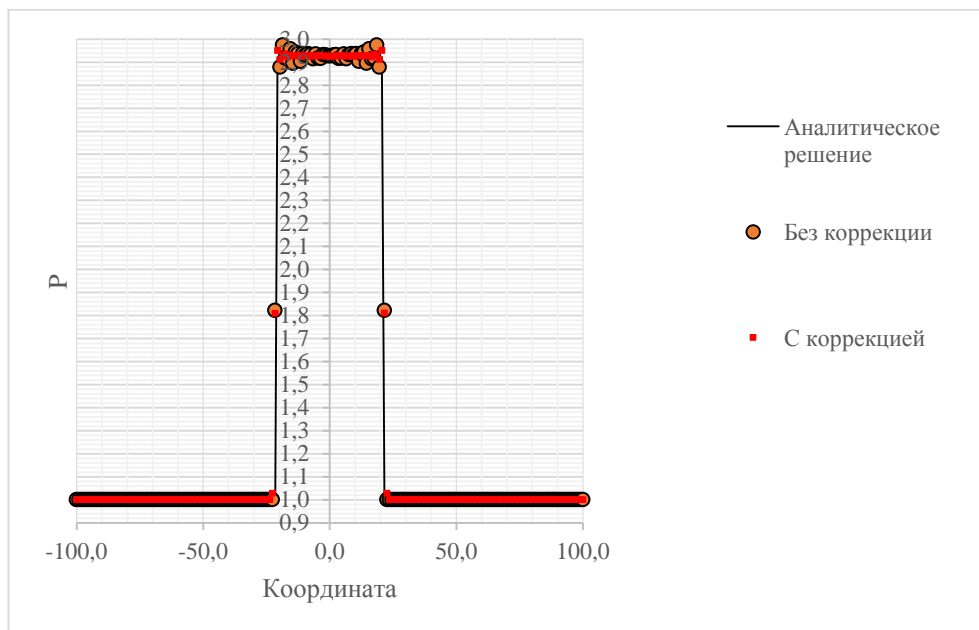


Рис. 8 Сравнительный график численного решения задачи Римана для двух ударных волн.

На основании проведенных тестов вычисляется точность алгоритма и его производительность. Делается вывод о завершенности метода, математической строгости при добавлении процедуры монотонизации и коррекции потоков, выполнении законов сохранения. Полученный метод целесообразно использовать в прикладных задачах.

Во второй главе приводится литературный обзор исследования гетерогенных сред на проблемы распространения возмущений при внешнем воздействии. Представлены результаты применения схемы Кабаре в задачах ударно-волнового нагружения.

В п. 2.1 Приводится краткий обзор экспериментальных и расчётно-теоретических работ по исследованию распространения возмущений в гетерогенных средах. Описаны современные подходы к описанию гетерогенных сред, учёт их микроструктуры, приводятся существующие результаты моделирования. В частности, рассмотрен один из вариантов гомогенизации среды. Проведен анализ уравнений состояния для описания твердой среды. Сделан выбор в пользу уравнения состояния в форме Тета (1)

$$p_x = A \left( \left| \frac{\rho}{\rho_0} \right| - 1 \right)^n \quad (1)$$

В заключении приведена математическая постановка задачи ударно-волнового нагружения среды в гидродинамическом подходе. В

В п. 2.2. Предложено два способа описания гетерогенных материалов:

- описание с помощью методов осреднения по объему;
- учет каждой фазы, входящей в гетерогенную среду отдельно.

При использовании каждого из этих подходов возникают трудности при учете диссипации ударных волн. При сильных соударениях возникает проблема учета предела упругости материала и пластичности. Параметры, описывающие эти случаи, различаются для материалов, поэтому в первом подходе заметно усложняются способы осреднения этих параметров, а во втором учет каждого параметра фазы в модели влечет последующее чрезмерное усложнение задачи.

Сравнительный анализ двух подходов осуществляется на задаче затухания ударных волн в среде-мишени при нагружении ударным воздействием. В процессе расчета свойства пластинки-ударника считаются постоянными, а удар - мгновенным.

В главе приведена процедура гомогенизации среды, осреднённые уравнения. Показаны и сравнены ударные адиабаты, проведена валидация.

На рис. 9 представлены ударные адиабаты для хорошо изученных материалов: медь и сплав меди с вольфрамом. Продемонстрирована хорошая сходимость с экспериментом гомогенизированной системы уравнений.

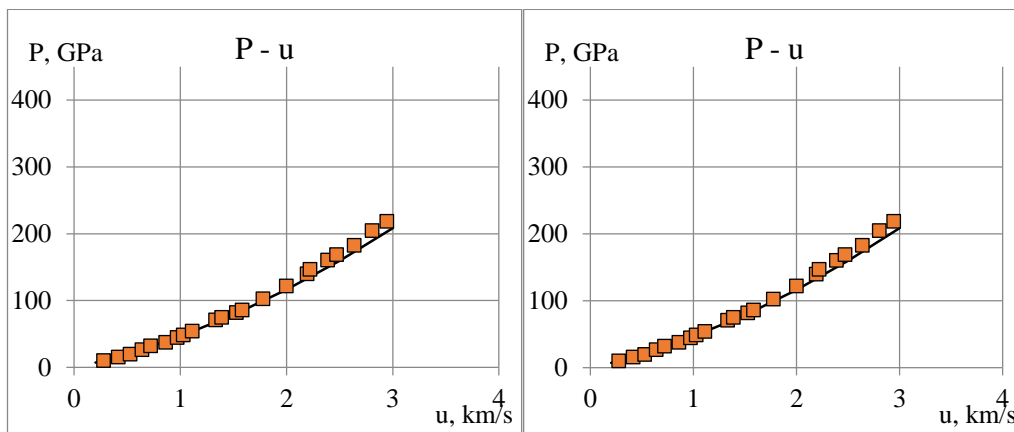


Рис. 9. Ударные адиабаты меди (слева) и сплава меди (75%) с вольфрамом (25%). Линия – расчёт. Квадраты – экспериментальные данные.

В заключении следует отметить, что процедура гомогенизации хорошо работает, когда количество фаз в гетерогенной системе достаточно большое, а их свойства различаются незначительно. В тоже время второй подход даёт лучше сходимость, однако при большом количестве фаз процедура становится более трудоёмкой.

В п. 2.3. приводится процедура применения схемы Кабаре в задаче ударно-волнового нагружения для гомогенизированной среды. Рассматривается Максвелловская математическая модель твердой среды, описанная в виде законов сохранения в Лагранжевых координатах в одномерной постановке. Для замыкания используется уравнение состояния в форме Тета. Для закона сохранения энергии, при учёте температуры и термодинамических эффектов при ударно-волновом нагружении, в общем случае требуется процедура расщепления схемы Кабаре по физическим параметрам. Поэтому считаем, что температура слабо меняется в процессе ударно-волнового нагружения, поэтому не будем учитывать её вклад в задачу. Далее приводится

алгоритмизация исходных уравнений, определение характеристик и инвариантов системы.

Для апробации полученного алгоритма расчета была рассмотрена задача ударно-волнового нагружения для двух металлических гомогенных материалов в начальной стадии процесса. Математическая постановка задачи выглядит следующим образом: Ударник налетает на мишень с известной начальной скоростью, для которых построена своя расчётная область. Процедура соударения задана алгоритмом контактных границ с условием непротекания.

На Рис. 10 проведена верификация метода на примере соударения меди с медью с скоростью 660 м/с. Подтверждена сходимость на мелкой сетке.

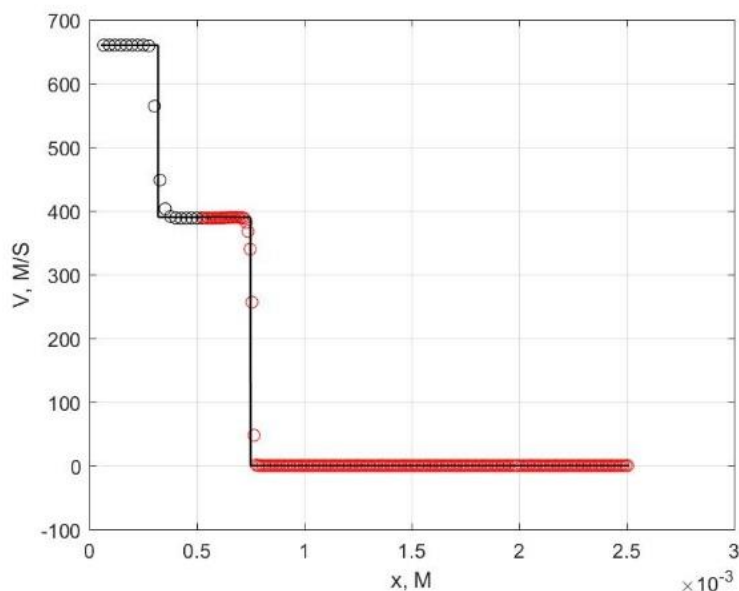


Рис. 10 Профиль скорости при одноосном нагружении медной мишени медной пластинкой. Сравнение с аналитическим решением.

Другим результатом был сравнительный анализ с расчётом в программном комплексе LS-Dyna. Соударение проходило для двух одинаковых материалов. Толщина ударника 0.1 м, толщина мишени – 1 м. Скорость соударения – 500 м/с. Сравнение расчетов показано на Рис. 11. В начальный момент наблюдается качественная сходимость расчета схемой Кабаре с расчетами в LS-Dyna. Однако, в дальнейшем наблюдается расхождение., которое обусловлено интерференцией ударных волн. В программном пакете есть возможность реализовать только 3D постановку

данной задачи. Поэтому результаты после 5 мс сравнить не представляется возможным.

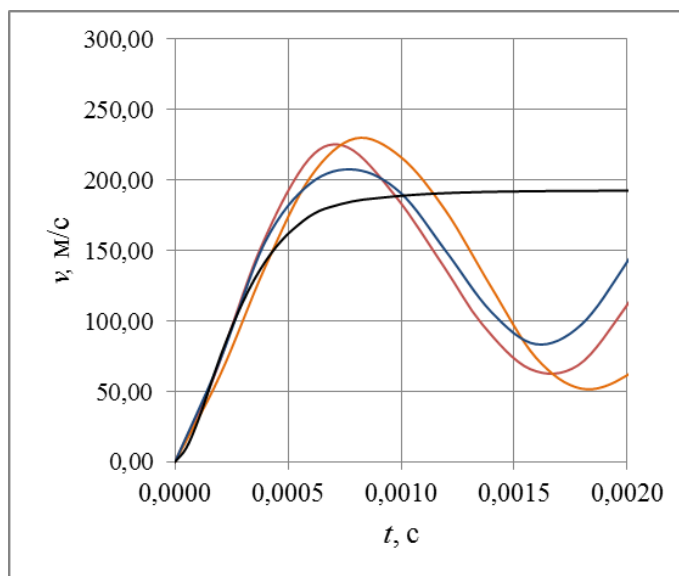


Рис. 11 Профиль скорости контактной поверхности. Сравнение результатов с пакетом LS-Dyna.

Заключительным этапом является валидация. Был повторён эксперимент численно. Постановка задачи выглядит следующим образом: происходит соударение алюминиевого ударника с медной мишенью. Сравнение проводится по профилю скорости контактной поверхности. Толщина ударника 0.2 мм, толщина пластинки – 0.7 мм. Скорость соударения – 660 м/с. На Рис. 12 видно, что данного уравнения состояния недостаточно для описания материала для задачи ударно-волнового нагружения. В первые моменты времени наблюдается качественное совпадение результата с данными эксперимента. Однако в последствии необходимо учитывать параметры упругости и пластичности металлов.



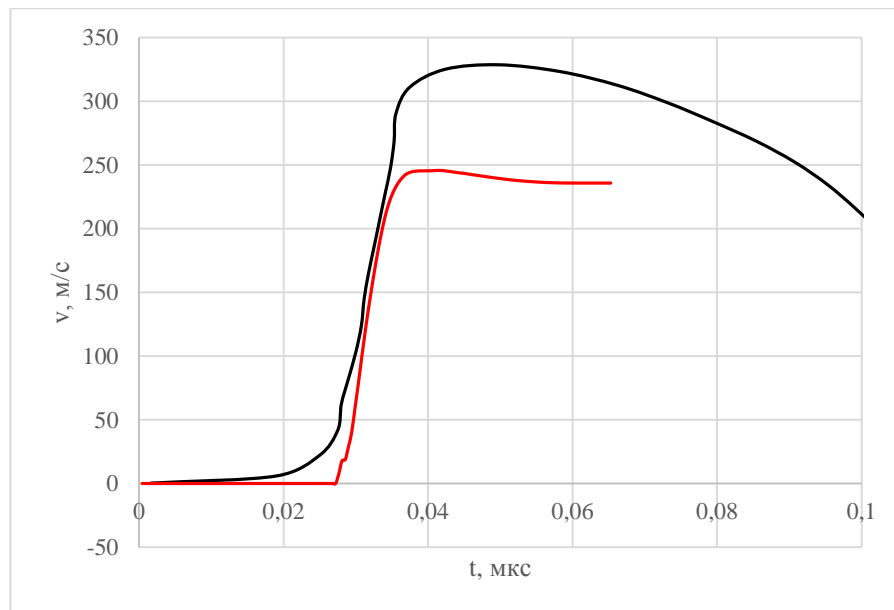


Рис. 12 Профиль скорости контактной поверхности. Сравнение с экспериментом.

В конце главы подведен итог исследования. Сделан вывод о хорошей верификации метода и возможности применения в задачах ударно-волнового нагружения. Продемонстрирована валидность и сравнение с коммерческим пакетом на начальных этапах нагружения.

**В третьей главе** приводится исследование распространения ударной волны в канале прямоугольного сечения, заполненного невязким равновесным газом, внутри которого располагаются как проницаемые, так и непроницаемые преграды. Представлены результаты проведенного исследования.

В п.3.1 приводится актуальность и необходимость в данном исследовании. Потребность в решении подобных задач возникает в угольной промышленности, где в горных выработках возможны взрывы с последующим распространением ударных и детонационных волн. Задача обнаружения и последующей локализации крайне важна с целью устранения техногенных аварий.

Одним из опасных факторов является избыточное давление на фронте ударной волны. В ходе распространения ударной волны в выработке происходит ее ослабление. Ослабление осуществляется с помощью трех факторов: вовлечение в движение дополнительных воздушных масс воздуха,

трение о стенки выработки и падение давления при прохождении сопряженных зон горных выработок. Для решения проблемы рассмотрен вариант включения в выработку перегородок особой конструкции с целью снижения давления ударной волны.

Приведён анализ литературных источников по расчётно-экспериментальному исследованию данной проблемы: расчет ударно-волновых процессов в шахтах с учетом взрывозащитных сооружений, моделирование нестационарных процессов вентиляции в сети выработок угольной шахты в работе и др. На основании этого предложена математическая модель в виде системы нестационарных уравнений описывающих течение невязкого равновесного газа без учета химических реакций. Для замыкания системы уравнений применяется уравнение состояния идеального газа с постоянной теплоёмкостью. Также учтены твердые частицы угольной пыли и капли воды. В качестве заслона выступает сетчатая проницаемая преграда. Для ее описания применяется математическая модель пористого материала. Рассмотрена вторая степень закона фильтрации Дарси-Форхгеймера, коэффициент пористости рассматривался исходя из расчета проницаемости реального заслона (2).

$$S_n = -C_0 V^2 \quad (2)$$

В п.3.2 Приведена постановка задачи. Приводится двумерный расчёт в программном пакете ANSYS и схожий расчёт двумерным вариантом схемы Кабаре. На Рис.13 приведена геометрия расчетной области. Уравнения неразрывности, сохранения количества движения, сохранения энергии ограничивались двумерным случаем. В начальный момент времени во всей расчетной области задавалось абсолютное давление 0,1 МПа, на левой границе выработки задавалось абсолютное давление 0,7 МПа.

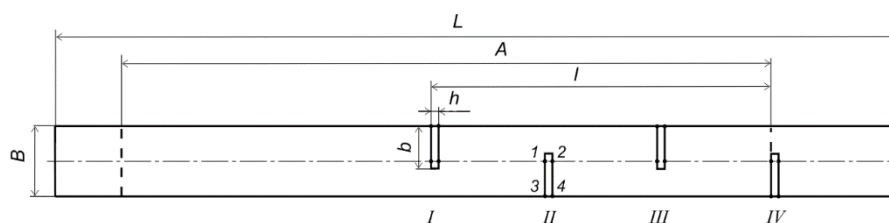


Рис.13 Геометрия расчётной области

В программном комплексе ANSYS Fluent процессе расчета формировался ударно-волновой фронт,двигающийся слева направо по выработке в направлении первой преграды. Расчет прекращался по достижении правой границы выработки. Для решения полученной системы уравнений в ANSYS Fluent использовался решатель density-based AUSM Flux Type, модуль расчета течения в пористой среде, явная схема второго порядка точности, структурированная расчетная сетка состояла из  $\approx 150$  тыс. ячеек, шаг по времени  $\approx 0,3$  мс. В программном комплексе ANSYS Fluent было проведено два расчёта: для проницаемых и непроницаемых преград

Поскольку для силового каркаса преград заслона характерно высокое значение площади плоских фронтальных поверхностей силовых элементов, то расчеты динамики давления вблизи непроницаемой ( $\phi=0$ ) первой преграды следует считать предельным случаем нагрузки на силовой каркас преград заслона. Согласно расчетам пиковое импульсное давление достигает в этом случае 2,5 МПа (Рис. 14), продолжительность импульса давления после первого отражения ударной волны 20 мс. Особо внимание следует уделить непроницаемым угловым конфигурациям, где вследствие многократного переотражения ударных волн могут возникать повторные интенсивные пиковые нагрузки.

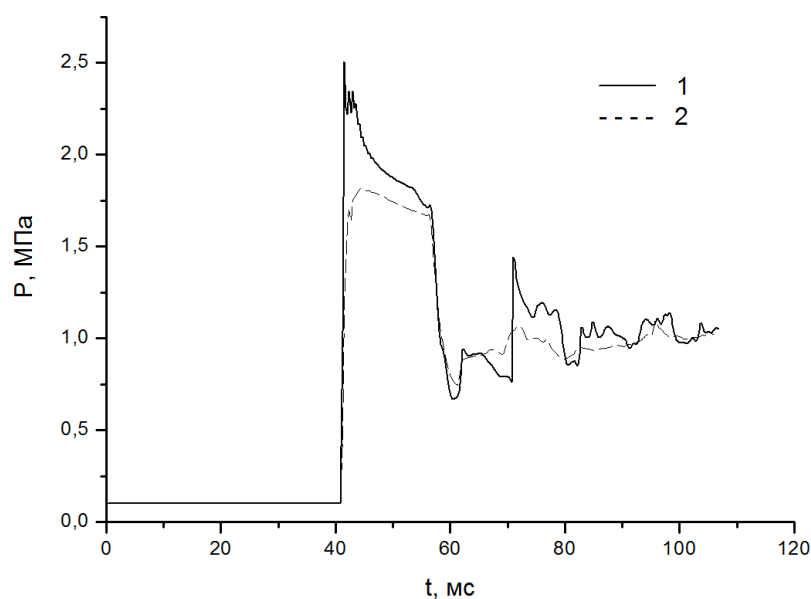


Рис. 14 Зависимость давления от времени в расчетной точке 1 на оси первой преграды. 1 – сплошная преграда; 2 – проницаемая преграда

Проницаемость преград существенно снижает давление на фронтальной поверхности первой преграды – 1,8 МПа. На прохождение фронтом давления проницаемой преграды требуется время, поэтому повышение давления на тыльной поверхности преграды происходит с задержкой, не компенсируя таким образом в полной мере первоначальный высокий перепад давления между фронтальной и тыльной сторонами преграды.

Полученные значения давления в расчетных точках на фронтальных и тыльных поверхностях преград в момент отражения ударной волны в зависимости от местоположения преград показывают, что имеет место монотонное снижение давления по мере прохождения ударно-волновым фронтом области расположения заслона.

Для ударно-волновых процессов в каналах со сложной внутренней геометрией характерно с течением времени возникновение областей с аномальными газодинамическими параметрами. Во внутреннем пространстве выработки могут на непродолжительные промежутки времени возникать области повышенного давления. Так, после отражения от первой проницаемой преграды ударная волна достигает правого борта выработки, в результате повторного отражения от него возникает перемещающаяся вдоль

правого борта выработки в обратном направлении область аномально высокого давления до 2,2 МПа (Рис.15).



Рис.15 Поле давлений после отражения ударной волны от проницаемой преграды. Перемещающаяся область аномального давления вблизи правого борта выработки

Для сравнения был проведен расчет распространения ударной волны в газодинамическом канале с непроницаемыми преградами. В угольной выработке в каркасе перегородок заслона характерно высокое значение площади плоских фронтальных поверхностей силовых элементов. Поэтому расчеты динамики давления вблизи непроницаемой первой перегородки можно считать предельным случаем нагрузки на силовой каркас перегородок заслона. Согласно расчетам, пиковое импульсное давление достигает 2,5 Мпа.

После отражения от первой проницаемой перегородки ударная волна достигает нижней поверхности выработки, в результате повторного отражения возникает перемещающаяся вдоль нижней поверхности область аномально высокого давления 2,2-2,5 МПа (Рис. 16). Наличие такой области характерно для всех расчетов, как и в программном комплексе ANSYS Fluent, так и двумерной схемой Кабаре. Расхождение результатов составляет 5%.

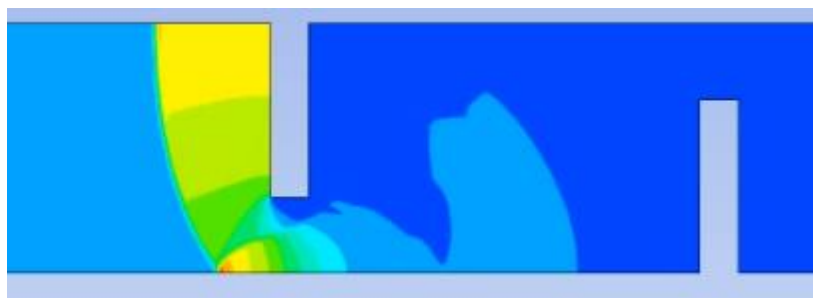


Рис. 16. Перемещающаяся область аномального давления вблизи нижней поверхности выработки.

Последующее прохождение ударной волны за областью аномально высокого давления характеризуется следующим явлением. На Рис. 17 продемонстрировано появление повторного, более интенсивного, пика давления на оси симметрии второй перегородки для расчета с непроницаемыми стенками.

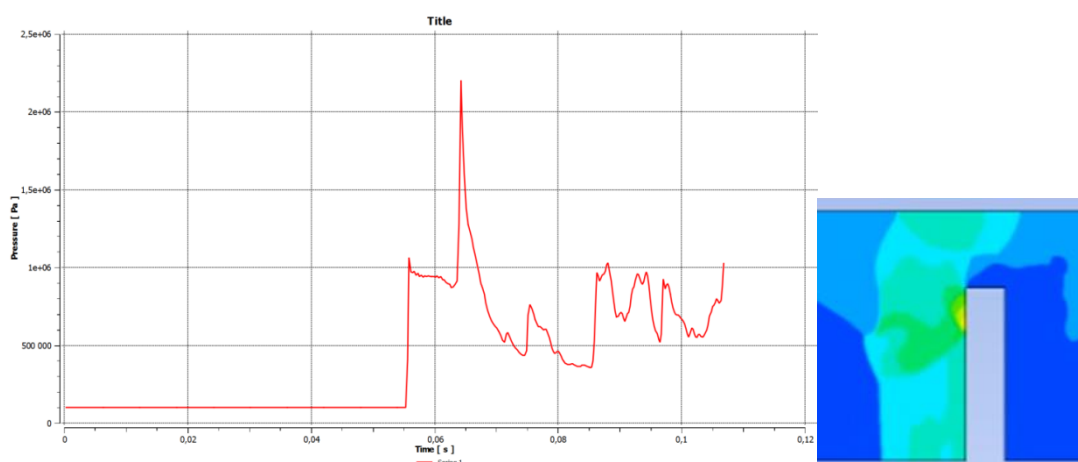


Рис. 17 Повторный пик давления на второй перегородке

Проницаемость перегородок также существенно снижает давление на фронтальной поверхности первой перегородки – 1,8 МПа.

Расчет был проведен для двух разных типов заслонов, соответствующих разной пористости ( $\phi_3 = 0,392$ ,  $\phi_1 = 0,416$ ). Было выявлено, что увеличение пористости снижает давление фронтальной поверхности первой перегородки (1,8 МПа, 1,75 МПа). Оба типа преград снижают фронтальное давление на 0,7 МПа. В силу задержки прохождение фронта давления проницаемую перегородку повышение на тыльной поверхности

происходит с задержкой, не компенсируя таким образом первоначальный пик давления

Таким образом, в исследованных в расчетах конфигурациях заслона набегающая ударная волна оказывает наибольшее силовое воздействие на первую преграду. В результате ослабления ударно-волнового фронта на ней остальные преграды нагружены значительно меньше. Увеличение проницаемости первой преграды может позволить более равномерно распределить давление от набегающей ударной волны между преградами заслона.

В результате отражения от преграды на ее поверхности за фронтом отраженной ударной волны формируется область высокого давления в несколько раз превышающее давление за фронтом набегающей ударной волны. Данный эффект является одним из ключевых при разработке и проектировании перспективных проницаемых заслонов.

В заключении работы были выданы рекомендации по снижению площади фронтальных плоских поверхностей и избегать объемных полузамкнутых конфигураций для предотвращения кумулятивного роста давления. Возможно рассмотрение вопроса о формировании обтекаемых элементов на фронтальных плоских поверхностях с целью снижения ударно-волновой нагрузки.

Данным расчетом была продемонстрирована на практике высокая валидность схемы Кабаре, получен и подтвержден в программном комплексе ANSYS Fluent расчет ударно-волновых процессов в выработке с непроницаемыми перегородками. Расчет с проницаемыми преградами был проведен в ANSYS Fluent в силу ограниченности времени, затрачиваемого на решение задачи.

**Выводы и практические результаты:**

1. Усовершенствован метод конечных разностей Кабаре в приложении к системам гиперболических уравнений с полным и неполным набором инвариантов.
2. Предложен вариант схемы Кабаре для системы с полным набором газодинамических законов сохранения. Проведена верификация метода на тестовых задачах. Сравнение схемы с другими вариантами показало быстроедействие и высокую точность счёта по сравнению с аналогами.
3. Проведено сравнение двух подходов к гомогенизации среды на примере ударных адиабат. Подходы применены к задаче ударно-волнового нагружения гомогенизированной среды в одномерной постановке. Проведена валидация полученных результатов и сравнение с аналогичной задачей, решенной с помощью коммерческой программы LS Dyna.
4. Построена модель описания гетерогенной двухкомпонентной среды в дивергентной консервативной форме в виде системы газодинамических законов сохранения. На тестовых задачах в одномерном случае проведена верификация метода Кабаре для системы газодинамических законов сохранения.
5. Получены профили распространения ударных волн в прямоугольных каналах с проницаемыми и непроницаемыми преградами. Проведено сравнение результатов двумерной схемы Кабаре с данными, полученными в коммерческом пакете ANSYS Fluent. Вынесены рекомендации по проектированию систем защиты от ударно-волнового воздействия в горных выработках.



## Приложение

Публикации в зарубежных рецензируемых журналах (Web of Science, Scopus)

1. V. M. Fomin, B. V. Postnikov, V. A. Kolotilov, N. F. Florea, V. S. Shalaeв, and Y. V. Shalaeв - Modeling of shock-wave processes in the mine working with a permeable barrier. AIP Conference Proceedings 2125 (2019), 030008 doi.org/10.1063/1.5117390
2. V.A. Kolotilov – Application of the Cabaret scheme in task of shock-wave loading. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 511 (2019) 012002 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/511/1/012002
3. V.A. Kolotilov, V.M. Fomin, “Two methods of mathematical formulation of heterogeneous media in problems of shock wave loading. AIP Conference Proceedings 2027, pp 030144 (2018); doi 10.1063/1.5065238

Публикации в Российских рецензируемых журналах (из списка ВАК)

1. Фомин В.М., Постников Б.В., Колотилов В.А., Шалаев В.С., Шалаев Ю.В., Флоря Н.Ф. Моделирование ударно-волновых процессов в выработке с проницаемыми преградами // Физико-технические проблемы добычи полезных ископаемых, 2019 DOI:10.15372/FTPRPI20190103

Др. публикации (тезисы конференций и тд.)

1. Колотилов Вадим Алексеевич (ИТПМ СО РАН), Фомин В.М., Постников Б.В., Шалаев В.С., Шалаев Ю.В., Флоря Н.Ф. Моделирование ударно-волновых процессов в горной выработке с проницаемым заслоном // XXVI Всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды», посвященная 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина
2. Колотилов В. А. Применение схем высокого порядка точности в задачах моделирования гетерогенных систем в процессе нагружения // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы

докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск-Шерегеш, 15 - 22 марта 2019 г.) / под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2019. –С. 67.

3. Колотилов В.А. – Применение схемы Кабаре в задачах ударно-волнового нагружения материалов // Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения» (Томск 26-30 ноября 2018).

4. Kolotilov V.A., Fomin V.M. Two methods of mathematical formulation of heterogeneous media in problems of shock wave loading // XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13 - 19 Aug., 2018) : abstracts. –Novosibirsk: 2018. – Pt. II. –P. 149.

5. Колотилов В.А., Исследование распространения ударных волн в одномерных конденсированных гетерогенных средах. Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск-Шерегеш, 19 - 22 марта 2018 г.) / под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2018. –С. 67.

6. Колотилов В.А. Исследование распространения импульса в средах переменной плотности, Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск-Шерегеш, 20 - 23 марта 2017 г.) / под ред. В.В. Козлова. Новосибирск: Параллель, 2017. –С. 67