## Численное моделирование высокоскоростного нагружения подводного трубопровода, заполненного жидкостью

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, НИИ Механики лаборатория динамики многокомпонентных сред

Кочетков Михаил Анатольевич dom-mike@mail.ru, +7 920 039 71 00

# Применяемые модели и методы при решении задачи высокоскоростного нагружения подводного трубопровода

- Схема Годунова, единая как для расчета конструкций так и сжимаемых сред на эйлеровых и лагранжевых сетках. Модификации схемы до второго порядка точности на гладких решениях с сохранением монотонности на разрывных.
- Использование точного решения задачи распада разрыва (задачи Римана) для определения параметров на границах и контактных поверхностях (конструкция-конструкция, конструкция-жидкость, газ –жидкость)
- 3. Использование многосеточных алгоритмов для расчета движения лагранжевых граничных и контактных поверхностей на неподвижных регулярных эйлеровых сетках (лагранжевые сетки для задания и сопровождения контактных поверхностей конструкций и сред, неподвижные эйлеровые сетки для интегрирования внутри тел и сред, адаптирующиеся эйлерово-лагранжевые сетки для расчета движения контактных границ).
- 4. Теория пластического течения с изотропным упрочнением для моделирования динамики упругопластических элементов конструкций.

## Многосеточные алгоритмы в разработанном авторском коде, с помощью которого выполнено численное моделирование высокоскоростного нагружения подводного трубопровода

- 1. Использование неподвижных эйлеровых регулярных сеток позволяет избежать проблем, связанных с искажениями при больших перемещениях и деформациях и обеспечивает максимальную точность аппроксимации;
- 2. Многосеточные алгоритмы и использование решений задачи распада разрыва позволяют с высокой точностью выделять контактные и граничные поверхности тел и сред лагранжевое отслеживание подвижных поверхностей объектов на неподвижных эйлеровых сетках;
- Использование стандартных STL файлов, созданных с помощью известных CAD систем (КОМПАС 3D и др.), для задания и сопровождения граничных и контактных поверхностей тел и сред резко упрощает этап препроцессора подготовки геометрической модели и данных для решения конкретной задачи. Все виды сеток автоматически строятся на основе этих STL файлов;
- 4. В качестве постпроцессора (визуализация результатов 3D расчетов) используется находящаяся в открытом доступе система VISIT;
- 5. Использование явной схемы интегрирования и многосеточных методик позволяет эффективно распараллелить основные численные процедуры и алгоритмы.

# Апробирование/верификация разработанного авторского кода на тестовых задачах

Возможность моделирования геометрически и физически нелинейных динамических задач взаимодействия упругопластических сред с жидкостью, газом, грунтами, нелинейными уравнениями состояния и детонациями.

Ранее решенные нелинейные задачи:

- 1. Взрыв в стальном контейнере с водой;
- 2. Взрыв в полой трубе с воздухом;
- 3. Метание упругопластических тел взрывом шарового ВВ;
- 4. Действие кумулятивной струи при детонации трубчатого заряда на стальную преграду;
- 5. Моделирование детонации П-образного заряда и его взаимодействие с преградой;
- 6. Высокоскоростное ударное взаимодействие деформируемых тел;
- Моделирование наклонного пробивания упругопластических преград деформируемым ударником;
- 8. Торможение и рикошет деформируемого ударника при высокоскоростном взаимодействии с двухслойной мишенью.

#### Постановка задачи

- Рассматривается участок подводного трубопровода длиной 6 м, внутренний диаметр и толщина стальной трубы соответственно 115 и 2.7 см (внешний радиус R = 58.85 см), толщина бетонного покрытия (БП) 10 см, параметры взяты из [1]. Предполагается, что нижняя часть трубопровода находится над жестким дном на высоте 19.8 см (ось трубопровода проходит на высоте 90 см от дна). Центр сферического заряда диаметром 0.5 м и массой 123 кг находится на высоте 65 см от дна на расстоянии 130 см от центра трубопровода (от поверхности заряда до бетонного покрытия трубы 35 см). Инициация ВВ происходит в центре заряда. Размеры расчетной области 290х200х600 см, на внешних границах области ставятся условия "свободного вытока". Реализация этих условий осуществляется присвоением граничным значениям параметров из прилегающих ячеек.
- Предполагается, что трехмерный подводный трубопровод наполнен жидкостью (водой). Начало координат находится на оси Z в середине трубы. В начальный момент давление во всех средах и внутри трубопровода полагалось равным 0.1 МПа. На рис.1 изображена поверхностная сетка (STL файлы всех объектов, кроме воды) по стальной трубе, бетонному покрытию и сферическому заряду BB; также изображена поверхность дна; всего, включая воду внешнюю и внутреннюю, порядка 700 тысяч треугольников.



Рис. 1 Постановка задачи

#### Постановка задачи

- На Рис. 2 приведена основная кубическая расчетная сетка (сечение в плоскости Z=0) по СТ, БП, внешней и внутренней воде и ВВ, размеры ячеек сетки по каждой среде соответственно 0.5, 2, 3 и 2 см, всего порядка 14.8 млн ячеек. Выбор данной сетки и граничных условий был произведен после ряда предварительных расчетов с оценкой влияния действия прямых и отраженных ударных волн на трубопровод с тем, чтобы исключить возможное нефизичное влияние близко расположенных границ расчетной области. Механические характеристики двухслойного трубопровода: сталь Х70 и бетон с железорудным наполнителем [2], соответственно, плотности 7.85 и 2.5 г/см3, объемные модули упругости 168 и 22.2 ГПа, модули сдвига 77.7 и 15 ГПа, пределы текучести 500 и 80 Мпа. Предполагается идеальная пластичность этих сред. Ввиду кратковременности нагрузок для бетона предполагалось равенство модулей на сжатие и растяжение.
  - Подводный трубопровод заполнен той же жидкостью, что и внешняя область (водой). Для воды в уравнении Тета показатель адиабаты γ =7.15, B= 304.5 MПa, c = 1450 м/c, и эти параметры полагались постоянными в процессе всего нагружения. Октоген был выбран как одно из наиболее мощных используемых взрывчатых веществ. Расчеты проводились на компьютере с процессором i9-13900K (24 ядра, 32 потока) до времени 1.6 мс, соответствующему окончанию основной взрывной нагрузки. Расчет одного варианта занимал порядка 53 часов. Ударная волна от расширяющихся продуктов взрыва распространяется по водной среде и нагружает БП, которое в свою очередь взаимодействует со СТ и внутренней жидкостью. Наблюдается достаточно сложная нелинейная картина взаимодействия волн во внешней и внутренней жидкости с конструкцией подводного трубопровода.



٠

Рис. 2 Фрагмент расчетной сетки с подводным трубопроводом и зарядом



Рис. 3 Взаимодействие ударной волны с конструкцией подводного трубопровода, заполненного жидкостью в центральном сечении Z=0 в моменты времени: 0,51 мс., 0,73 мс., 1,23 мс.



Рис. 4 Взаимодействие ударной волны с конструкцией подводного трубопровода, заполненного жидкостью в сечении по длине трубопровода (Ү=О) в моменты времени: 0.278 мс., 0,904 мс, 1,413 MC

-0.40.20.00.20.4 X-Axis, t=0.001413 c

Скорости распространения возмущений по СТ и БП выше, чем во внешней и внутренней жидкости, но амплитуда их существенно меньше, чем от головной ударной волны. На Рис.3 в моменты времени 0,51 мс., 0,73 мс., 1,23 мс показано распространение ударных волн по внешней и по внутренней жидкости в центральном сечении Z=0. Шкалы отображения давлений в СТ, БП и в жидкостях отличаются для наилучшего визуального восприятия. На рисунке хорошо видно отражение ударной волны от твердой донной поверхности. Происходит взаимодействие падающих и отраженных ударных волн в жидкостях. Можно отметить существенное изменение ударной волны за счет ее многочисленного отражения от поверхностей. Радиус газового пузыря в районе взрыва на момент времени 0.123 мс становится соизмеримым с диаметром подводного трубопровода.

На Рис.4 показаны взаимодействия ударных волн в сечении Y=0, в моментах времени 0,278 мс., 0,904 мс, 1,413 мс. Наблюдается отражение набегающей ударной волны от поверхностей трубопровода и уход ударной волны по длине подводного трубопровода.



Рис.5. График зависимости давления от времени во внутренней жидкости подводного трубопровода в точке ближайшей к заряду Рис.6. График зависимости скорости по оси X от времени на стальной оболочке подводного трубопровода в точке ближайшей к заряду





На Рис.7 Форма поперечного сечения (Z=0) подводного трубопровода при t=0 и при t= 1,52

### Результаты расчетов

На Рис.5 показана зависимость давления от времени во внутренней жидкости подводного трубопровода в точке ближайшей к заряду. Из-за наполненности внутреннего пространства подводного трубопровода жидкостью (водой) происходит отражение давления и его взаимодействие с оболочкой трубопровода. Максимальное давление в выбранной точке во внутренней жидкости подводного трубопровода достигается к моменту времени

На Рис.6 показана зависимость скорости по оси X от времени на стальной оболочке подводного трубопровода в точке ближайшей к заряду. Наибольшая скорость в 365 м/с наблюдается в момент времени 0.25 мс, между тем в подобной постановке задачи с подводным взрывом вблизи трубопровода, но не заполненного жидкостью [2] максимальная скорость достигает 380 м/с в момент времени 0.3 мс. В той же выбранной точке западение скорости по оси X к моменту времени 1.2 мс в заполненном жидкостью трубопроводе доходит до значения 75 м/с, при том, что в трубопроводе без внутренней жидкости скорость по оси X в момент времени 1.2 мс составляет порядка 125 м/с.

На Рис.7 показаны формы центрального поперечного сечения (Z=0) подводного трубопровода при t=0 и при t= 1,52 мс. К моменту времени 1,52 мс интенсивное формоизменение практически завершается. Заметны значительные деформации силовых оболочек подводного трубопровода, но которые существенно меньше, чем формоизменение для подводного трубопровода без внутренней жидкости [2]<sub>12</sub>



На Рис.8 График сравнения внешнего давления на внешнюю поверхность бетонной оболочки подводного трубопровода в точке ближайшей к заряду. Синяя кривая для трубопровода с внутренней жидкости, красная кривая без внутренней жидкости.

## Развитие методик и авторского кода для решения задач высокоскоростного взаимодействия деформируемого твердого тела с жидкостью/газом

1. Расширение библиотеки применяемых уравнений состояния жидкостей и деформируемого твердого тела;

2. Реализация моделей накопления повреждений и разрушения в упругопластических телах;

3. Реализация различных критериев инициирования детонации;

4. Повышение эффективности расчетов на кластерных ресурсах за счет большего распараллеливания алгоритмов.

## Выводы

- 1. Модифицированная схема Годунова [3] может быть использована для моделирования трехмерных динамических нелинейных задач взаимодействия элементов конструкций подводных трубопроводов с окружающей и заполняющей жидкостями.
- 2. Показано существенное влияние заполняющей жидкости на процесс деформирования подводного трубопровода, в том числе на его смещения, скорости и распределения гидродинамической нагрузки.
- 3. Отмечено существенное влияние жесткой донной поверхности на процесс деформирования подводного трубопровода.
- 4. Наличие внутренней жидкости в подводном трубопроводе существенно уменьшает деформации трубопровода в сравнении с деформациями подводного трубопровода без внутренней жидкости.

Автор выражает благодарность за помощь в проведении расчётов в.н.с. НИИ Механики ННГУ М.Х. Абузярову и с.н.с. Е.Г. Глазовой.

## Литература

1. <u>https://www.gazprom.ru/projects/nord-stream/</u>

2. М.Х. Абузяров, Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, М.А. Кочетков Моделирование процесса деформирования подводного газопровода под действием взрывной нагрузки // Вестник ПНИПУ. Механика, 2024, №2, С.97-104. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.2.103

3. Абузяров К.М., Абузяров М.Х., Кочетков А.В., Крылов С.В., Лисицын А.А., Модин И.А., Применение схемы Годунова для решения трехмерных задач высокоскоростного взаимодействия упругопластических тел, Матем. моделирование, 2023. Т. 35. №8, С. 97–115