

В четверг, 12 февраля 2026 г., 16-00, каб. 323, ул. Вавилова, дом 40, 3-й этаж, состоится заседание семинара:

**“Методы решения задач математической физики”**

(рук.: акад. С.И. Безродных, акад. Ю.Г. Евтушенко,  
В.И. Власов, С.Я. Степанов)

**ДОКЛАД**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТИ С ПОДВОДНЫМИ  
ТРУБОПРОВОДАМИ**

**М.А. Кочетков**

(НИИ механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

**А Н Н О Т А Ц И Я**

Экспериментальное изучение процессов взрывного воздействия на железобетонные конструкции, таких как стальные трубопроводы с бетонной защитной оболочкой, связано со значительными финансовыми расходами, а иногда, и невозможностью физического проведения эксперимента. Необходимо учитывать процессы инициирования и распространения детонации во взрывчатых веществах с генерацией внешних ударных волн, при расширении продуктов детонации и последующего взаимодействия ударных волн с элементами подводных трубопроводов, испытывающих значительные перемещения и деформации. Решение таких задач требует значительных вычислительных ресурсов даже в упрощенных постановках.

Целью данной работы является исследование нелинейного воздействия на подводный трубопровод ударных волн в жидкости, образованных от близкого взрыва сферического заряда взрывчатого вещества, а также, анализ влияния внутренней жидкости в заполненном подводном трубопроводе на формоизменения конструкции.

Рассматривается система уравнений деформированной сплошной среды в приближении сжимаемого упругопластического тела, переходящая при отсутствии сдвиговых напряжений в уравнения Эйлера для сжимаемой жидкости. Численное решение проводится по модифицированной схеме Годунова. В отличие от оригинальной схемы Годунова, предполагающей кусочно-постоянное распределение параметров (плотности, давления, скорости) в ячейках сетки и решение соответствующей задачи о распаде разрыва, предлагаемая модифицированная схема использует кусочно-линейную аппроксимацию параметров с узлами в центрах ячеек и решение задачи о распаде разрыва для значений, интерполированных в определенных точках. При подходящем выборе этих точек достигается второй порядок точности приближения линеаризованных уравнений для подвижной неравномерной сетки.

Разработана численная методика, реализованная в программном коде, позволяет проводить исследования трехмерных нелинейных процессов высокоскоростного взаимодействия жидкости и элементов подводных трубопроводов, подверженных значительным формоизменениям, с отслеживанием контактных границ. Методика использует три вида пространственных сеток: подвижная сетка из переменного числа треугольников, связанные с границами поверхности взаимодействующих сред – газа или элемента конструкции; неподвижная декартова сетка с переменным числом ячеек; наконец, набор декартовых сеток размера  $3 \times 3 \times 3$ , связанных с каждым из треугольников первой сетки. Параметры в неопределенных ячейках второй сетки определяются интерполяцией из проинтегрированных ячеек этой же второй сетки и из проинтегрированных параметров третьей сетки.

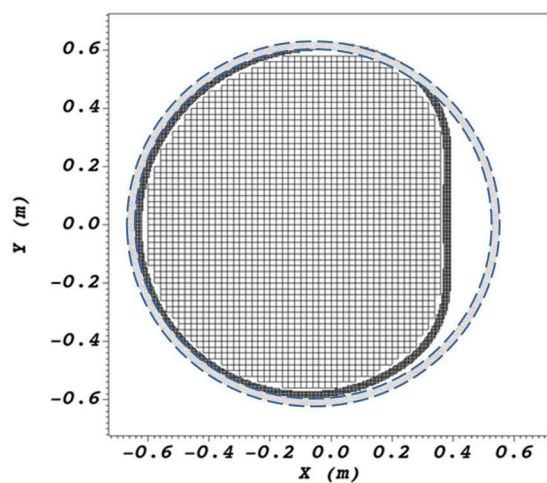
Проведена верификация полученных результатов расчётов на основе тестирования и сопоставления с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями, подтвердившая практическую значимость разработанной методики и корректность полученных оригинальных результатов расчетов.

Исследована трехмерная нелинейная задача взаимодействия ударных волн в жидкости с подводным трубопроводом с учетом влияния донной поверхности. Получены оригинальные результаты при исследовании совместного движения продуктов взрыва, окружающей жидкости и стенок подводного трубопровода под действием нелинейных подводных ударных волн.

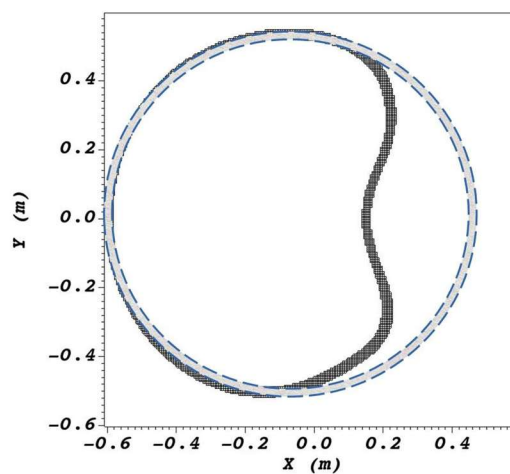
Выявлены закономерности в нелинейном воздействии ударных волн в жидкости на двухслойный подводный трубопровод, связанные с их отражением от донной поверхности. В трехмерной постановке описано движение продуктов взрыва, движение окружающей и заполняющей внутреннюю полость жидкости, а также, стенок двухслойного подводного трубопровода под действием образующихся нелинейных ударных волн.

При сопоставлении результатов расчета импульсного воздействия на подводный трубопровод (рис. 1), заполненный внутренней жидкостью, с результатами аналогичного расчета для трубопровода без внутренней жидкости выявлено значительное влияние наличия внутренней жидкости на формоизменения конструкции трубопровода при указанном воздействии.

Отметим, что программный код, разработанный в соответствии с предлагаемой методикой расчета трехмерных нелинейных задач высокоскоростного взаимодействия жидкости и элементов подводных трубопроводов, может быть встроен в уже существующие вычислительные комплексы, предназначенные для решения прикладных задач.



а)



б)

Рис. 1. Форма поперечного сечения подводного трубопровода при расчетном времени  $t=1,52$  мс после инициации импульсного возмущения: а) для трубопровода с внутренней жидкостью; б) для трубопровода без внутренней жидкости