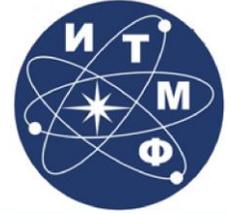




РОСАТОМ



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Расчёты экспериментов по воздействию сейсмозрывных волн на подземные сооружения с применением поэтапной технологии

*Шувалова Е.В., Краюхин А.А., Наумова Е.И., Резвова Т.В.,
Дьянов Д.Ю., Ильина М.В., Тихонова А.П., Синатова Т.Е.*

04.06.2025

Численное моделирование процессов функционирования конструкций играет важную роль при их разработке.

Экспериментальную отработку частично заменяют высокоточными численными расчётами.

Разномасштабность изучаемых процессов естественным образом приводит к разбиению на расчётные этапы.

В последнее время происходит развитие технологий связанных и сопряжённых расчётов для большего количества вычислительных экспериментов.

Высокую точность можно достигнуть проведением сквозных расчётов, охватывающих максимально возможное число этапов функционирования при минимальных вмешательствах в расчётный процесс.

Схема экспериментов по определению воздействия сейсмозрывной волны (СВВ) на заглублённый объект

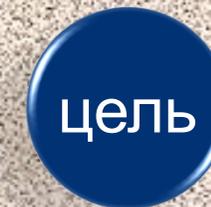
взрыв



СВВ



цель



I этап
начальная стадия развития
взрыва

II этап
стадия формирования и
распространения СВВ

III этап
стадия взаимодействия СВВ с
подземным сооружением

I и II этапы
стадия формирования и
распространения СВВ

Расчёт формирования и распространения сейсмозрывной волны по грунту в эйлеровых переменных
Процедура увеличения математической области в процессе счёта по мере продвижения сейсмозрывной волны по грунтовой среде

пересчёт

III этап
стадия взаимодействия СВВ с
подземным сооружением

Трёхмерный расчёт воздействия сейсмозрывной волны на подземное сооружение
Связанный расчёт с применением модуля лагранжево-эйлерова связывания (связь методик ЛЭГАК и ЛОГОС)

Резвова Т.В., Мышкина И.Ю., Спиридонов В.Ф., Циберев К.В. Пакет программ ЛЭГАК. Алгоритм решения связанных задач газодинамики и прочности на основе метода штрафа. Сб. "Труды XII международного семинара "Супервычисления и математическое моделирование" под р. Шагалиева Р.М. Саров. 2011. стр. 300-310

Aquaelet N., Souli M., Olovsson L. Euler-Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 2006. – Vol. 195. – Pp.110-132.

Связанные расчёты позволяют моделировать как воздействие на прочную конструкцию, так и влияние деформаций и перемещений элементов конструкции на параметры течения окружающей среды

Модуль связывания

Программный модуль «Логос Прочность» – расчёт деформируемой конструкции методом конечных элементов на нерегулярной сетке в лагранжевой постановке

Методика ЛЭГАК – расчёт течений окружающей среды конечно-разностной схемой аппроксимации на регулярной сетке в эйлеровой постановке

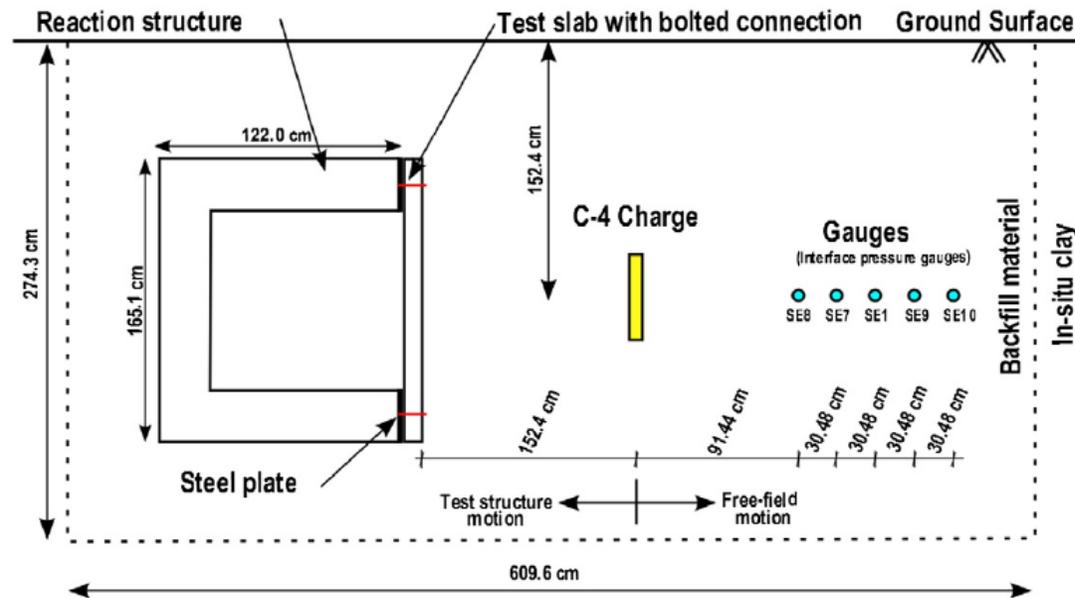
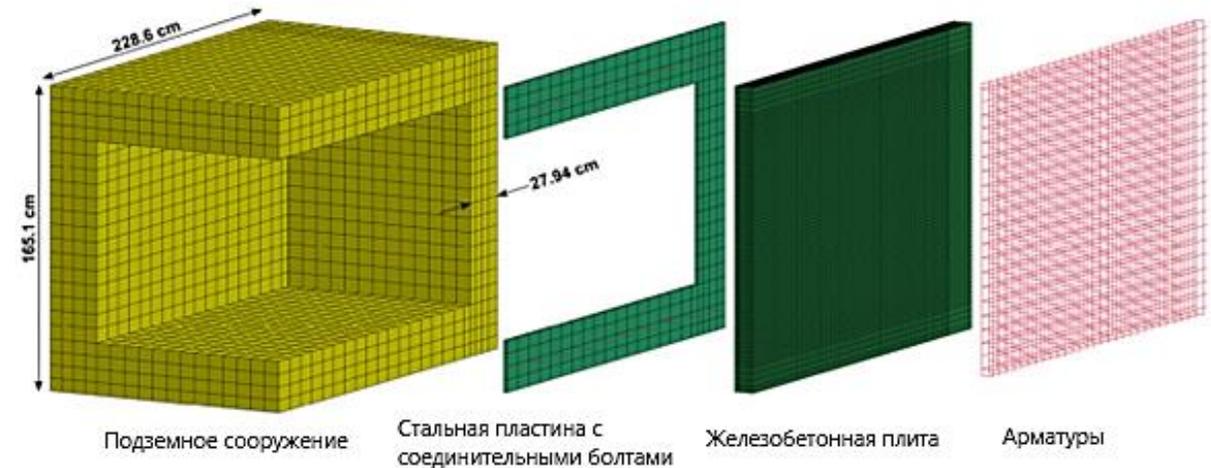
В модуле связывания реализованы два типа связывания лагранжевой и эйлеровой областей:

1. метод штрафа (метод Penalty);
2. метод кинематических ограничений.

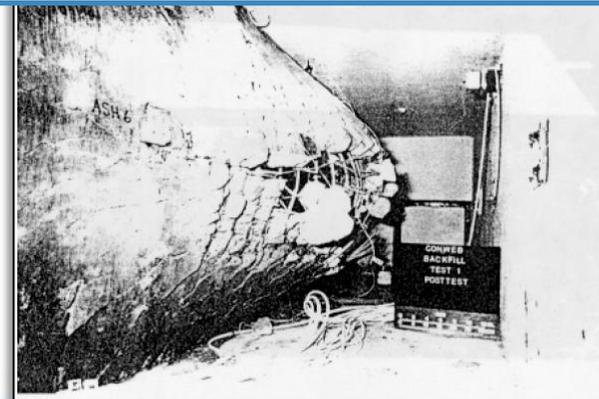
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВВ НА ЗАГЛУБЛЁННУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ

Modeling coupled blast/structure interaction with Zapotec, benchmark calculations for the Conventional Weapon Effects Backfill (CONWEB) tests: Preprint / Sandia; Bessette G.C.; SAND2004-4096. Sandia, 2004

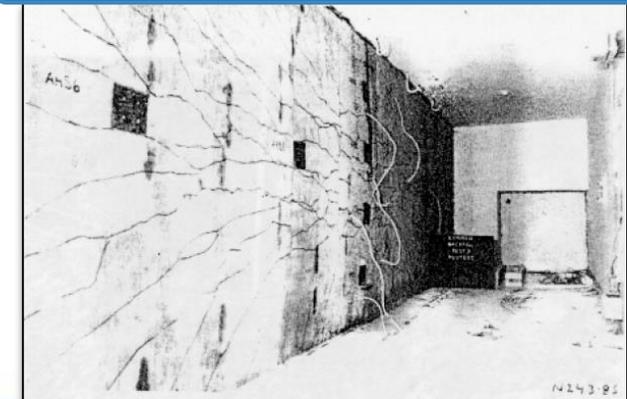
Схема имитатора подземного сооружения



Опыт № 1 (взрыв в глине)



Опыт № 3 (взрыв в песке)



Измерения в опытах:

- датчики в свободном грунте – массовая скорость и напряжение;
- датчики на железобетонной плите – смещение внутренней поверхности плиты.

ПОСТАНОВКА РАСЧЁТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВВ НА ЗАГЛУБЛЁННУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ (МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ)



Глина: плотность 1.96 г/см³, пористость 4 %, влажность 23 %
Песок: плотность 1.85 г/см³, пористость 26 %, влажность 5 %

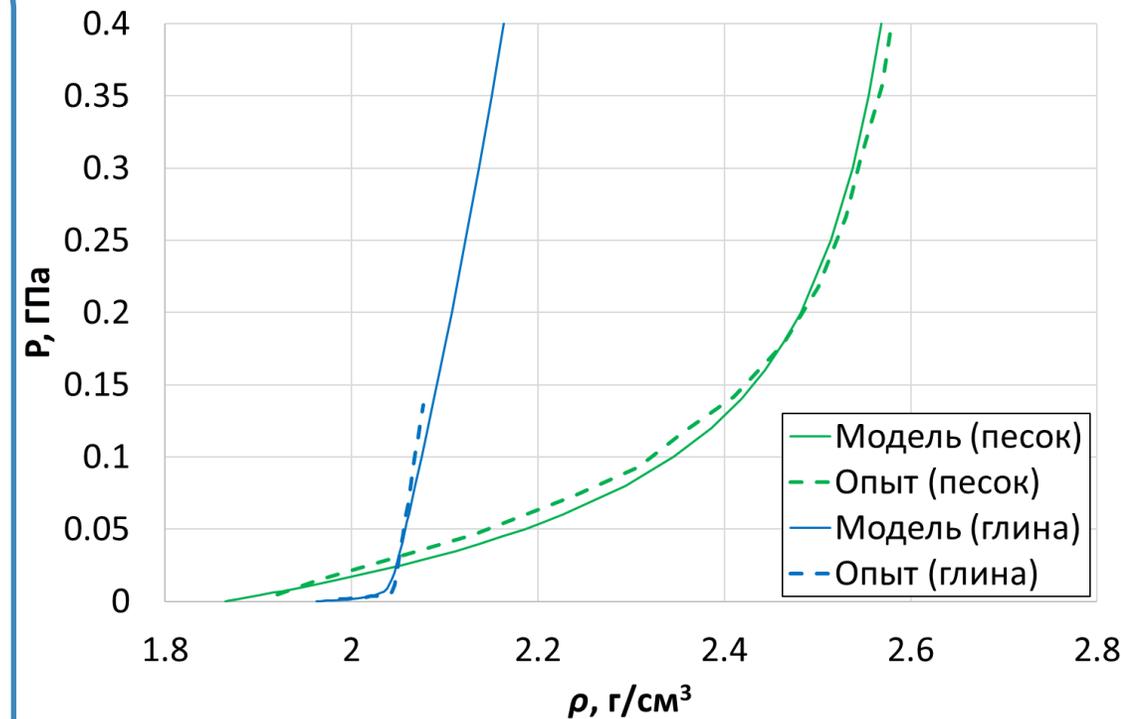
Для описания грунтовой среды всех типов (глины и песка) использовалась **упругопластическая релаксационная модель**

[Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. – М.: Наука, 1990. - 215 с].

Для описания продуктов взрыва - **УРС JWL** [E.L. Lee, C.M. Tarver. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids 23 (12), pp. 2362-2372, 1980].

Для описания стали – **УРС Ми-Грюнайзена и модель Мизеса** [Р. Мизес. Механика твёрдых тел в пластически-деформированном состоянии. Сб. «Теор. пласт.» под р. Ю.Н. Работнова. – М.: Госиноиздат, 1948. с. 57-69].

Для описания бетона – **модель КСС (Karagozian & Case Concrete)** [Marval L.J., Crawford J.E., Wesevich J.W., Simons D.A. Plasticity Concrete Material Model for Dyna3D. // Int. J. Impact Eng., Vol. 19, pp. 847-873, 1997], [Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Дьянов Д.Ю., Медведкина М.В. Модифицированная модель бетона Karagozian & Case в ПП «ЛОГОС» // Проблемы прочности и пластичности. 2023. Т. 85. №2, с. 224-242].



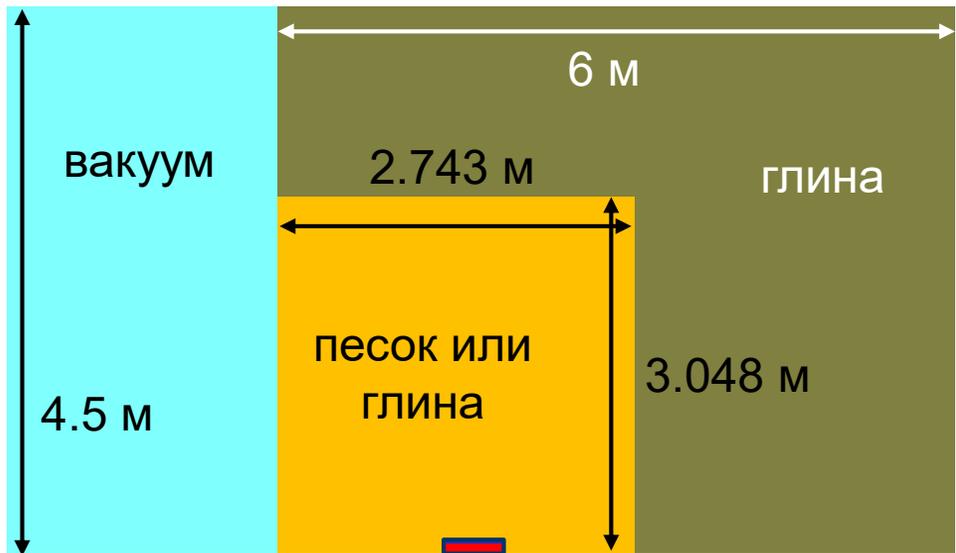
Кривые сжатия песка и глины

РАСЧЁТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВВ (ЭТАПЫ I И II)

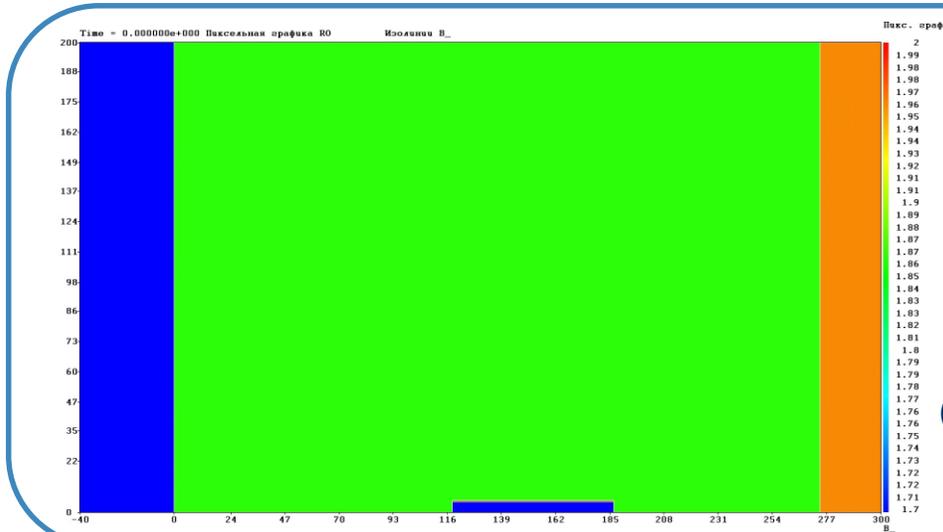


РОСАТОМ

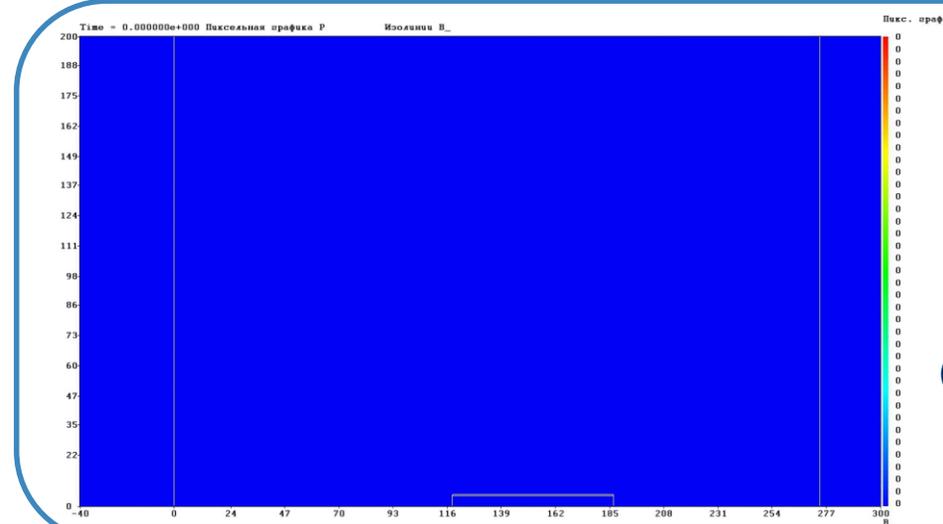
Схема начальной двумерной расчётной области



Цилиндрический заряд ВВ (С-4) 7кг в тонкостенном стальном корпусе на глубине 152.4 см



Изменение плотности песка на этапе формирования СВВ от заряда ВВ



Поле давлений в песке на этапе формирования СВВ от заряда ВВ

РАСЧЁТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВВ (СРАВНЕНИЕ С ОПЫТНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ В СВОБОДНОМ ГРУНТЕ)



Опыт № 1 (взрыв в глине)

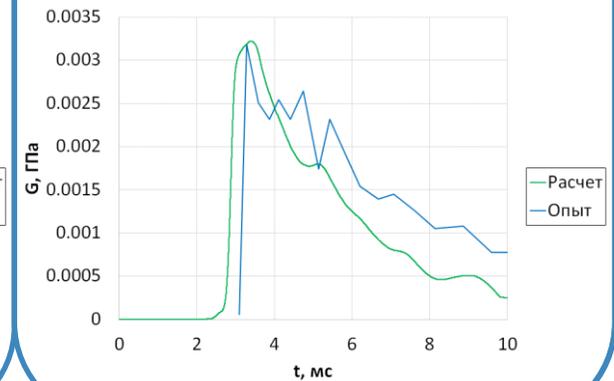
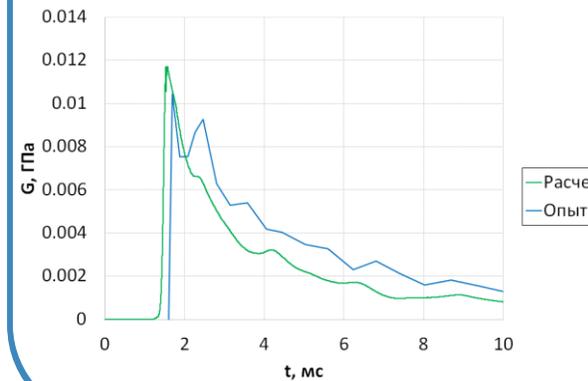
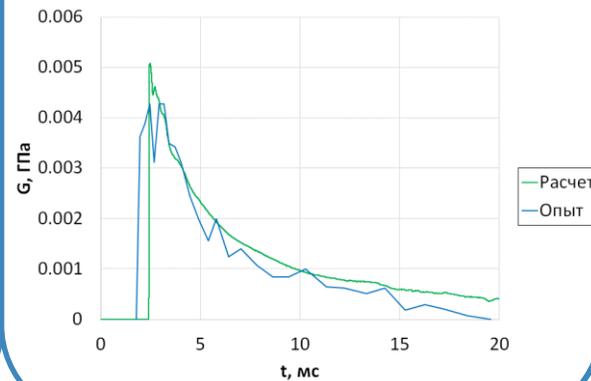
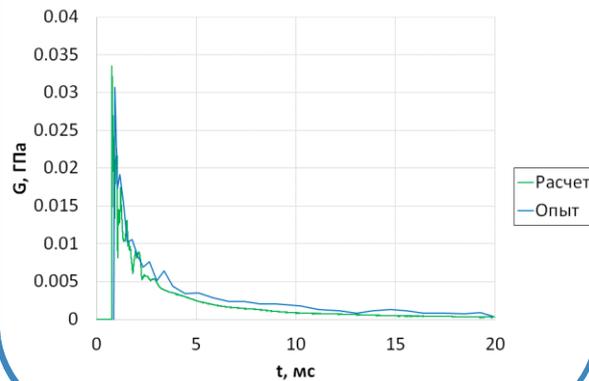
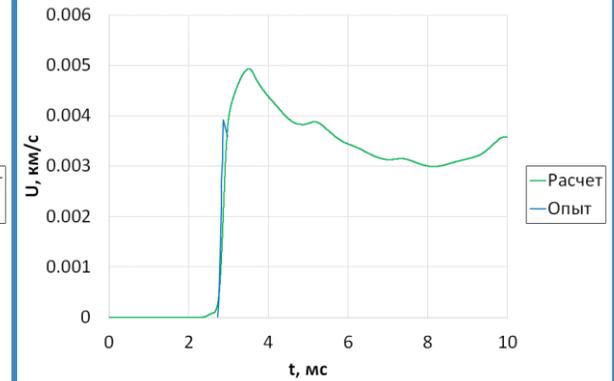
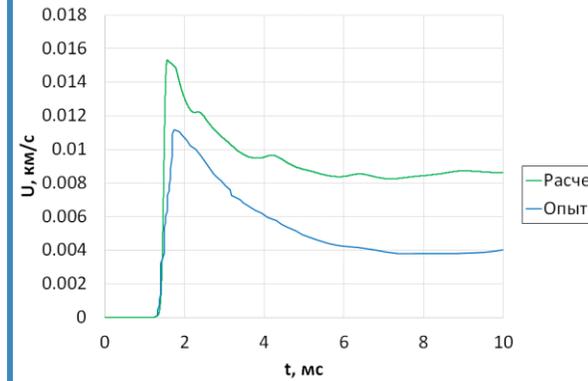
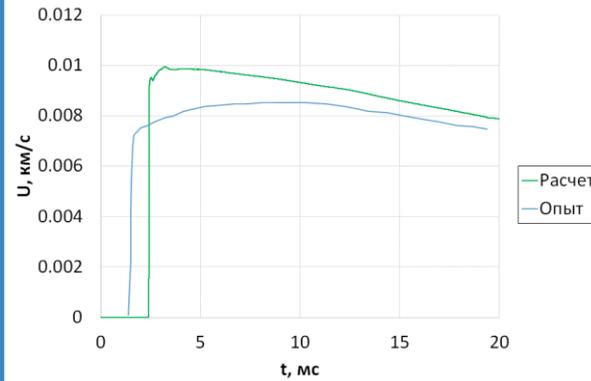
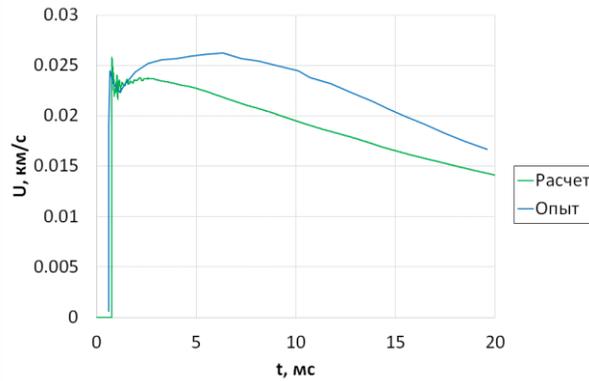
Опыт № 3 (взрыв в песке)

SE8 (91.4 см)

SE1 (152.4 см)

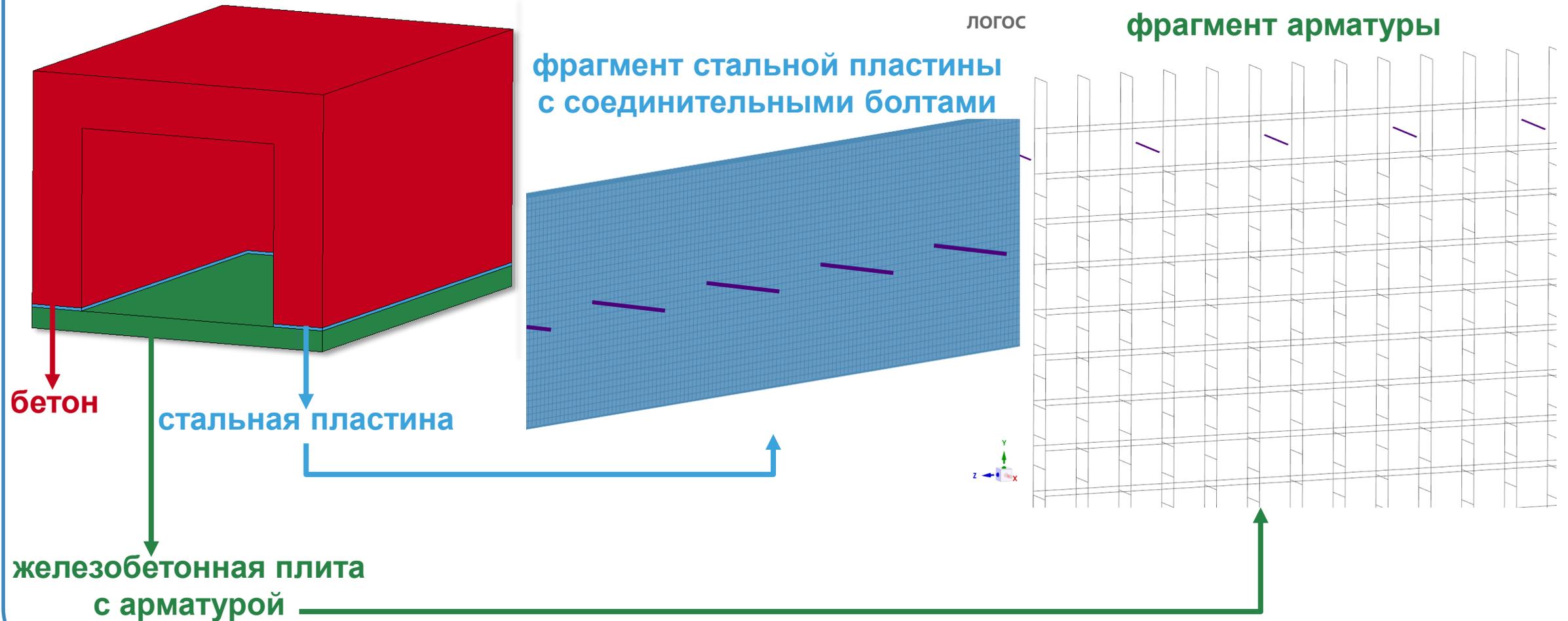
SE8 (91.4 см)

SE1 (152.4 см)



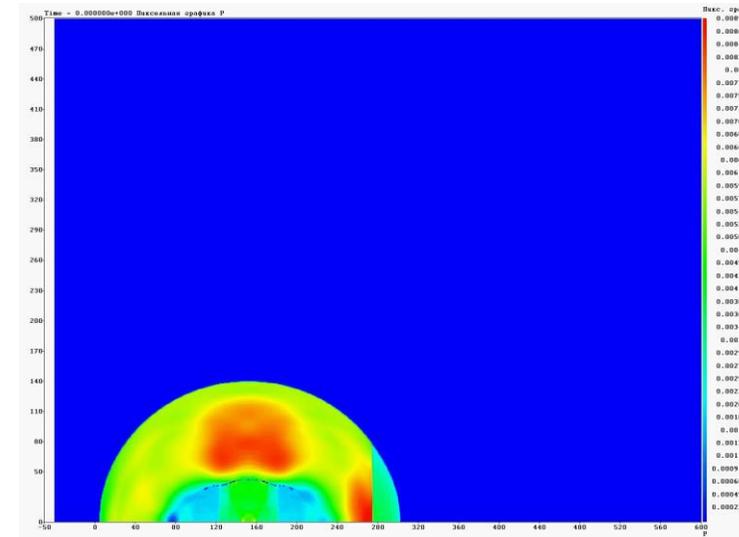
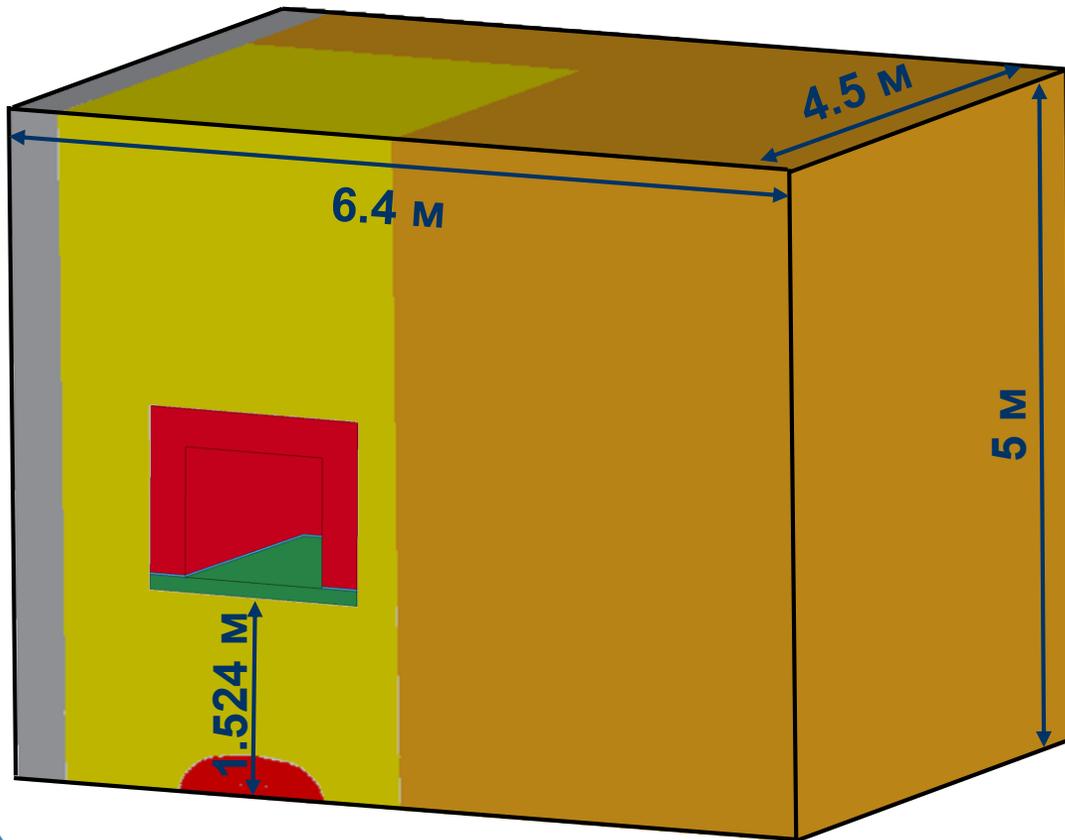
РАСЧЁТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВВ НА ЗАГЛУБЛЁННУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ (ЭТАП III)

Трёхмерная расчётная модель сооружения



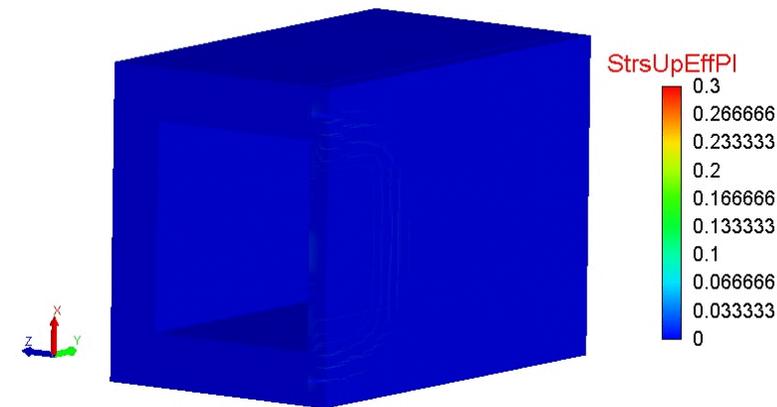
РАСЧЁТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВВ НА ЗАГЛУБЛЁННУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ

Схема начальной трёхмерной расчётной области



Поле давления в глине на этапе воздействия СВВ на железобетонную конструкцию

Scientific View MetLEGAk Time: 100.060690 сек Array: StrsUpEffPI Min/max: 0.000000e+00 : 2.153013e-02



Пластическая деформация железобетонной конструкции (Опыт № 1, взрыв в глине)

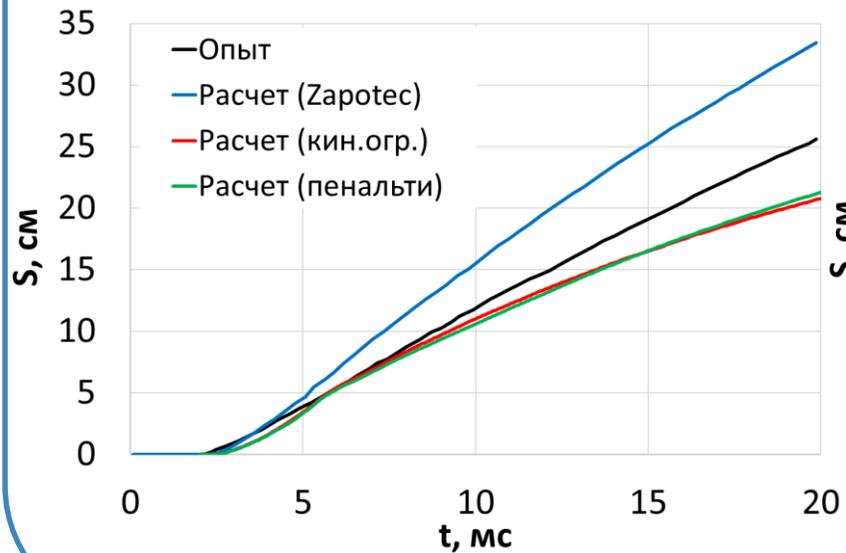
РАСЧЁТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВВ НА ЗАГЛУБЛЁННУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ (СРАВНЕНИЕ С ОПЫТОМ)



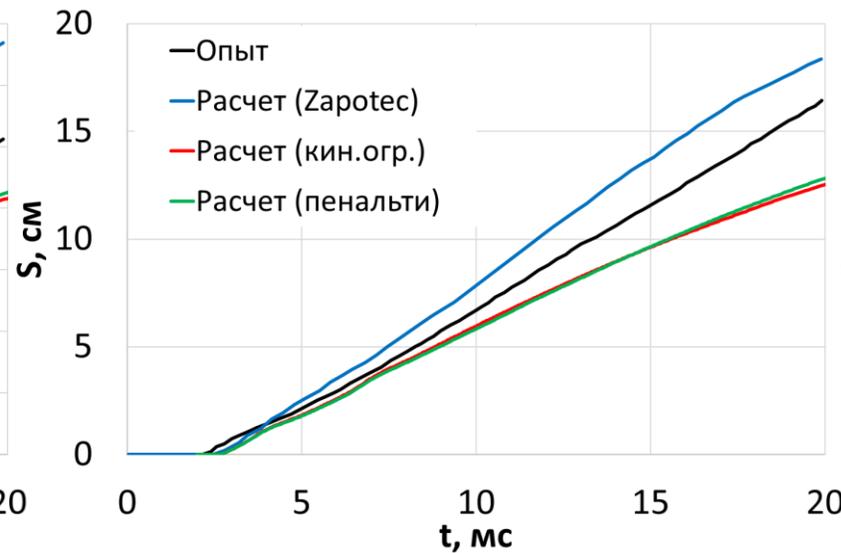
Опыт № 1 (взрыв в глине)

Временные зависимости смещения внутренней поверхности железобетонной плиты в различных датчиках

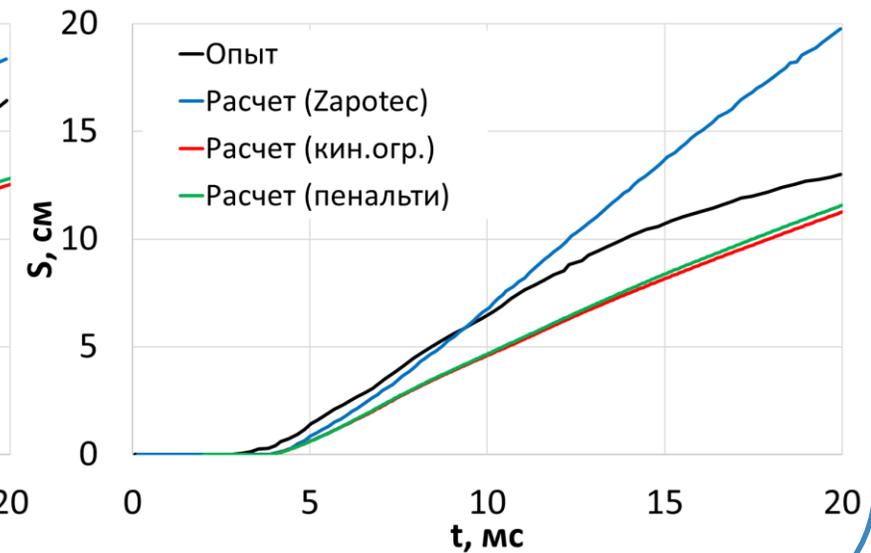
AHS0



AHS3



AHS6



Modeling coupled blast/structure interaction with Zapotec, benchmark calculations for the Conventional Weapon Effects Backfill (CONWEB) tests: Preprint / Sandia; Bessette G.C.; SAND2004-4096. Sandia, 2004

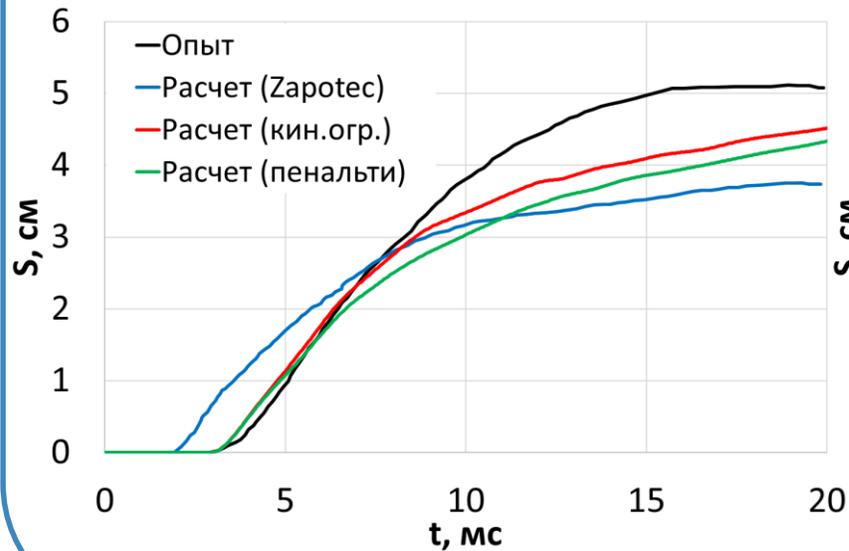
РАСЧЁТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВВ НА ЗАГЛУБЛЁННУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ (СРАВНЕНИЕ С ОПЫТОМ)



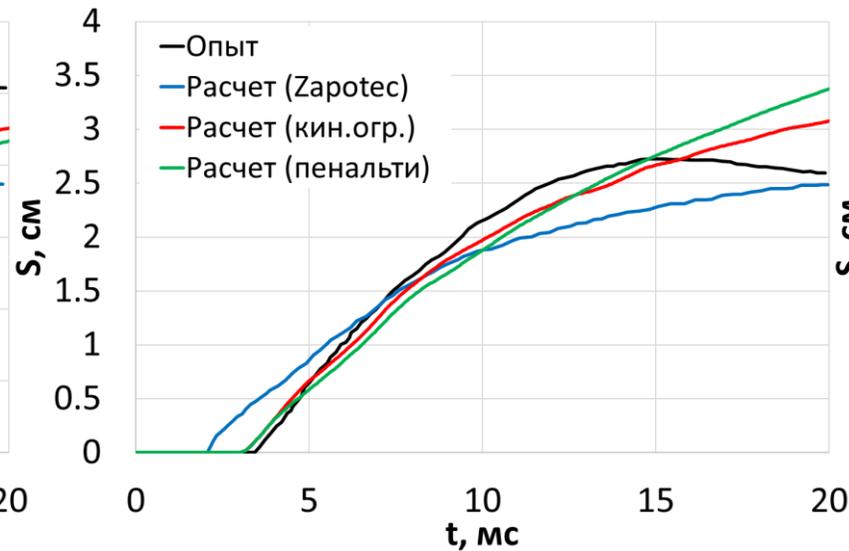
Опыт № 3 (взрыв в песке)

Временные зависимости смещения внутренней поверхности железобетонной плиты в различных датчиках

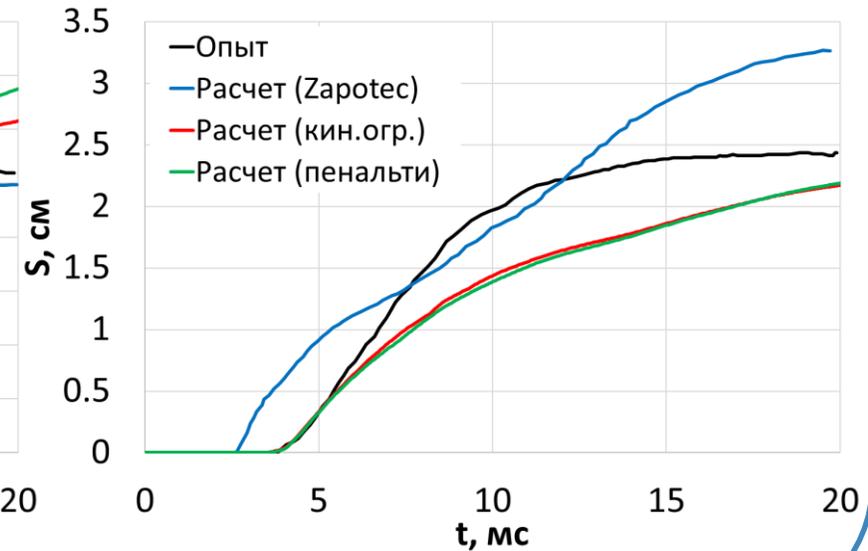
AHS0



AHS3



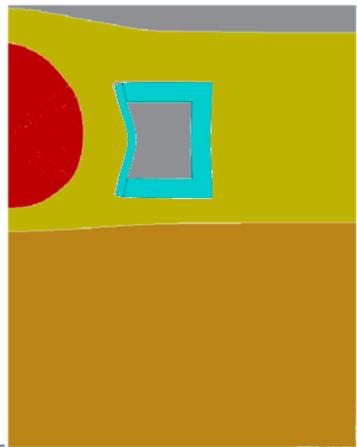
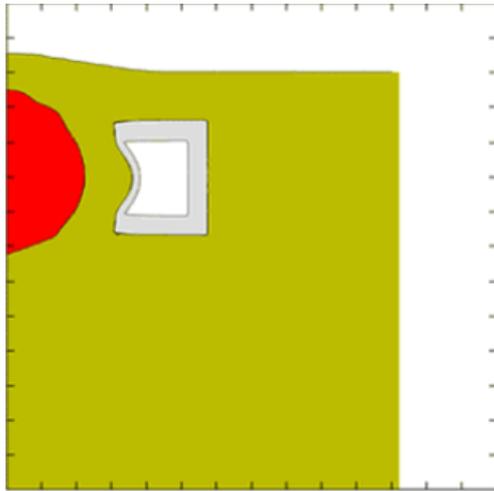
AHS6



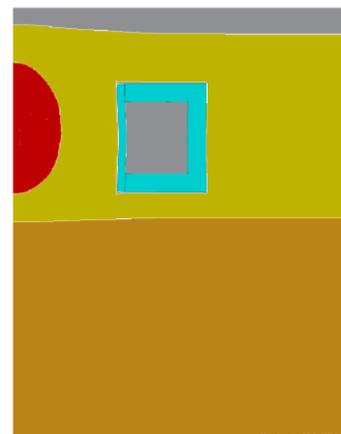
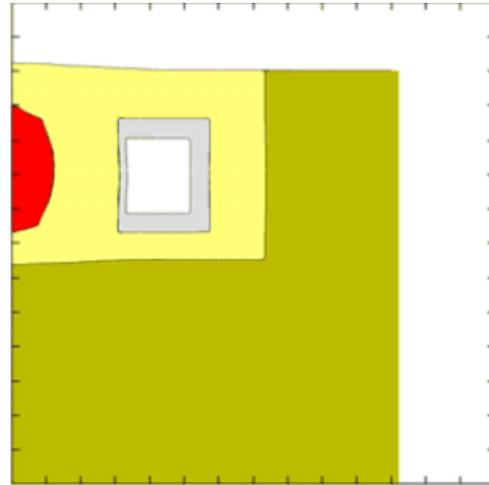
Modeling coupled blast/structure interaction with Zapotec, benchmark calculations for the Conventional Weapon Effects Backfill (CONWEB) tests: Preprint / Sandia; Bessette G.C.; SAND2004-4096. Sandia, 2004

РАСЧЁТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВВ НА ЗАГЛУБЛЁННУЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ КОНСТРУКЦИЮ

Опыт № 1 (взрыв в глине)

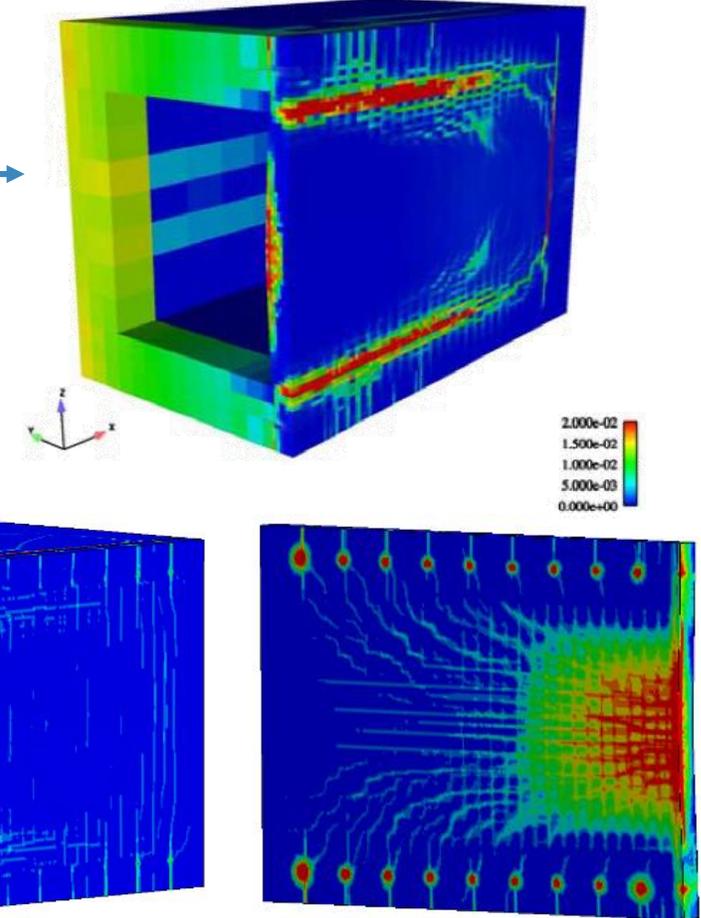


Опыт № 3 (взрыв в песке)



Опыт № 3 (взрыв в песке)
поле пластической деформации

← Zapotec →



Отработана расчётная технология на примере задачи по воздействию сейсмозрывной волны на железобетонную конструкцию для двух постановок эксперимента.

В расчётах получено, что деформации объекта практически не зависят от типа связывания нерегулярной и регулярной областей (метод штрафа и метод кинематических ограничений).

Результаты расчётов качественно согласуются с результатами опытов с точки зрения характера деформаций железобетонной плиты.

Максимальное отличие значения прогиба железобетонной плиты в разных точках её поверхности от опытных измерений составляет от 10% до 20%; максимальное отличие расчётной амплитуды массовой скорости грунта не более 20%, для напряжения расхождение не превышает 10%.



POCATOM

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ