

УДК 539.3

А.А.Ивушин (6 курс, каф. МПУ), Д.В.Шевченко, к.т.н., доц., А.И.Боровков, к.т.н., проф.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРФОРАЦИИ БЕТОННОЙ ПЛИТЫ СТАЛЬНЫМ СНАРЯДОМ

В современном мире бетон является одним из наиболее распространенных строительных материалов. Он широко применяется при строительстве как всевозможных гражданских объектов, так и различных защитных сооружений. Поэтому моделирование процессов пробивания бетонных образцов является актуальной задачей механики разрушения. При этом важной частью решения является выбор модели материала, описывающей сложные свойства бетона (пористая структура, накопление поврежденности).

В работе рассматривается процесс пробивания (perforation) цилиндрического бетонного образца стальным снарядом, имеющим стрельчатый торец. На рис. 1 приведена расчетная схема рассматриваемой системы — половина продольного сечения. Геометрические характеристики рассматриваемых объектов:  $r = 0.0375$  м,  $R = 0.7$  м,  $l = 0.225$  м,  $L = 0.4$  м.

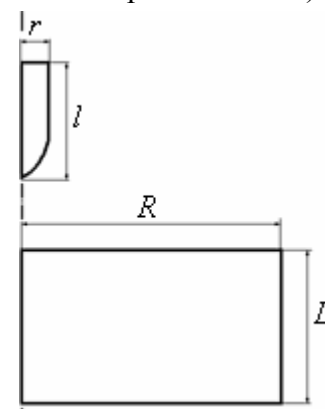
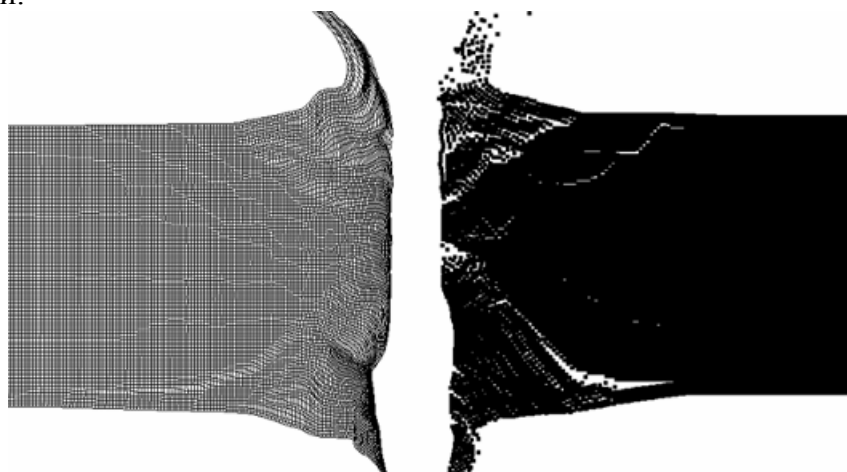


Рис. 1. Расчетная схема

В качестве определяющих соотношений для шаровой части тензора напряжений для стали используется линейная модель материала, а для бетона — модель пористого материала P- $\alpha$  [1]. Для описания связи девиаторной части тензора напряжений со сдвиговыми деформациями для стали используется вязкопластическая модель материала Джонсона-Кука (Johnson Cook), а для бетона — модель материала RHT Concrete (Riedel, Hiermaier, Thoma) [1]. Модель бетона RHT включает в себя также накопление бетоном поврежденности.



Lagrange formulation

SPH formulation

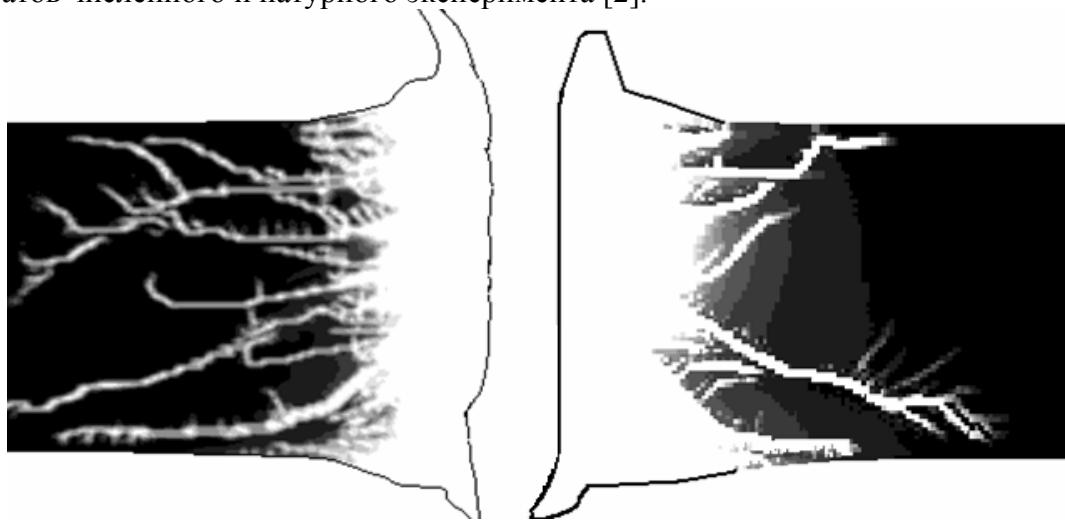
Рис. 2–3. Деформированная сетка

Рассматриваются материалы, имеющие следующие свойства: сталь — модуль Юнга  $E = 210$  ГПа, модуль сдвига  $G = 77$  ГПа, начальный предел текучести  $\sigma_y^0 = 2.07$  ГПа, модуль линейного упрочнения  $H = 510$  МПа, плотность  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>; бетон — модуль Юнга  $E = 58$  ГПа, модуль сдвига  $G = 25$  ГПа,  $\rho = 2770$  кг/м<sup>3</sup>.

Решение проводится в осесимметричной постановке. Конечно-элементная (КЭ) модель содержит 250 элементов в снаряде, 15 000 элементов для бетона в Лагранжевой постановке (Lagrange formulation), 12 000 частиц для SPH-постановки (SPH formulation).

В результате решения динамической контактной задачи с учетом разрушения

материала (failure) определены, в том числе, поля распределения поврежденности материала. На рис. 2–3 приведены деформированные КЭ сетки ( $t = 1.6$  мс). На рис. 4–5 приведены распределения поврежденности материала ( $t = 1.6$  мс). На рис. 6 приведен график зависимости скорости снаряда (м/с) от времени (с). В табл. 1 приведено сравнение результатов численного и натурного эксперимента [2].



Lagrange formulation

SPH formulation

Рис. 4–5. Поврежденность материала (белые области — поврежденность  $D = 1$ )

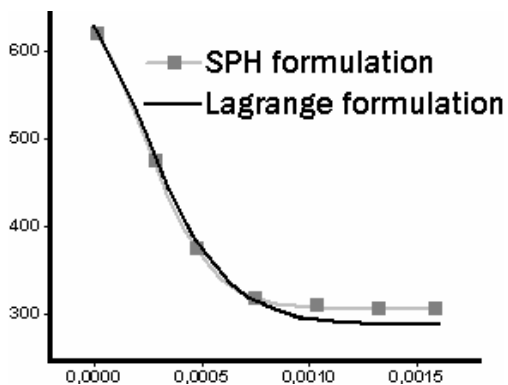


Рис. 6. Скорость снаряда в зависимости от времени

Таблица 1. Сравнение численного решения с экспериментом

	начальная скорость	остаточная скорость
Эксперимент 1	616	276
Эксперимент 1	616	303
Эксперимент 1	618	293
Lagrange	616	310
SPH	616	290

Результаты численного решения показывают, что использование выбранных моделей материалов и методов решения позволяют получить результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. AUTODYN: Explicit software for nonlinear dynamics. Theory manual. Revision 4.3.
2. Mattias Unosson. Numerical simulations of penetration and perforation of high performance concrete with 75mm steel projectile// Defence research establishment. November 2000.