

## Численный анализ проникания в бетонную преграду макетов ударников с учетом влияния отделяемого поддона

© С.В. Федоров<sup>1</sup>, В.А. Велданов<sup>1</sup>, А.Л. Исаев<sup>1</sup>,  
А.Ю. Перфильев<sup>2</sup>, Н.А. Федорова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup> АО «ГосНИИмаш им. В.В. Бахирева», Дзержинск, Нижегородская обл.,  
606002, Россия

<sup>3</sup> ФГУП «ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, 127055, Россия

*На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред проанализировано проникание в полубесконечную бетонную преграду макетов ударников диаметром 14 и 18 мм с начальной скоростью 1200 м/с без учета и с учетом влияния отделяемого поддона, используемого для разгона макетов в стволе баллистической установки. В процессе проникания макеты ударников и поддоны рассматривались как абсолютно твердые недеформируемые тела. Головная часть макетов ударников была конической с носовым притуплением или без него. Установлено положительное влияние притупления головной части на динамику проникания макетов ударников, заключающееся в увеличении их глубины проникания и снижении максимальной перегрузки, что связано, при наличии притупления, с проявлением кавитационного эффекта. При моделировании проникания макетов ударников, размещенных в отделяемом поддоне, зафиксировано уменьшение глубины проникания чуть более чем на 10 % при увеличении максимальной перегрузки по сравнению со случаем проникания в отсутствие поддона. Выявлена причина отрицательного влияния поддона на проникание макетов ударников, заключающаяся в возрастании касательных напряжений, действующих на поверхности контакта макетов с прилегающим слоем разрушенного бетона, вызванного поджатием этого слоя поддоном до тех пор, пока не происходит полное отделение поддона от макета ударника.*

**Ключевые слова:** бетонная преграда, макет ударника, отделяемый поддон, высокоскоростное проникание, глубина проникания, перегрузка, численное моделирование

**Введение.** Бетон широко используется при возведении различных зданий и сооружений [1, 2]. В ряде случаев при проведении аварийно-восстановительных и спасательных работ, а также контртеррористических операций возникает необходимость оперативно проделывать отверстия в бетонных преградах значительной толщины [3, 4]. Для реализации этого можно использовать высокоскоростные ударники, проникающие в бетон за счет запаса своей кинетической энергии [5–9]. Актуальной задачей является увеличение глубины их проникания в бетон [10–13].

Для ударников, изготовленных из высокопрочных материалов, можно обеспечить незначительность деформаций, возникающих под

действием нагрузок в процессе проникания в бетонную преграду, вплоть до скоростей взаимодействия на уровне 1000 м/с [14, 15]. Это позволяет рассматривать процесс проникания ударника как движение абсолютно твердого недеформируемого тела в сопротивляющейся среде — бетоне [16, 17]. Сила сопротивления бетонной преграды, определяющая динамику проникания ударника, зависит от величины нормальных и касательных механических напряжений, действующих на поверхности контакта головной части ударника с преградой [18–21]. Значения этих напряжений можно определить путем численного моделирования процесса проникания, основываясь на уравнениях механики сплошных сред [22–24].

В настоящей работе рассмотрено проникание в бетон макетов ударников, с которыми впоследствии было намечено провести модельные экспериментальные исследования. Цель работы — определить влияние величины притупления конической головной части макетов ударников на глубину проникания и на перегрузку, испытываемую макетами в процессе проникания [25], а также выяснить влияние на эти параметры проникания отделяемого поддона, предназначенного для разгона макетов ударников в стволе пороховой баллистической установки. Конструктивно поддон выполнен так, что обеспечиваются его жесткая связь с макетом ударника при их движении с положительным ускорением в стволе баллистической установки и возможность отделения поддона от макета в процессе совместного проникания в бетонную преграду.

**Постановка задачи и тестовые расчеты.** Исследования динамики проникания макетов ударников в бетонную преграду проводились на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред в предположении, что взаимодействие макета с бетонной преградой происходит по нормали к ее поверхности. При этом бетонная преграда предполагалась полубесконечной [26], а макеты — недеформируемыми.

Для определения механических напряжений, возникающих в материале бетонной преграды в ответ на ее деформирование, принималась модель сжимаемой упругой среды с модулем объемного сжатия  $K = 15$  ГПа и модулем сдвига  $G = 10$  ГПа до момента разрушения бетона и сжимаемой упруго-пластической среды после разрушения [1]. Для описания динамической сжимаемости бетона, рассматриваемого как среда с пористостью, использовали линейную баротропную зависимость

$$p = \frac{K}{\alpha_0} \left[ \frac{\alpha_0 \rho}{\rho_{m0}} - 1 \right], \quad (1)$$

где  $p$  — давление в бетоне;  $\rho$  — плотность бетона;  $\alpha_0$  — параметр пористости бетона, определяемый через плотность бетона  $\rho_0$  в нормаль-

ных условиях (при нулевом давлении) как  $\alpha_0 = \rho_{m0}/\rho_0$ ;  $\rho_{m0}$  — плотность материала матрицы в нормальных условиях (в данном случае использовалось значение  $\rho_{m0} = 2650 \text{ кг/м}^3$ , соответствующее плотности кварца при нулевом давлении).

До момента разрушения предполагалось, что пористость бетона  $\alpha_0$  не изменяется. Плотность бетона в нормальных условиях принималась  $\rho_0 = 2400 \text{ кг/м}^3$ , при данном значении  $\rho_0$  его пористость составляла  $\alpha_0 = 1,104$ .

В качестве критерия разрушения бетона рассматривался критерий Баландина [27]

$$s_r^2 + s_z^2 + s_r s_z + \tau_{rz}^2 = \frac{1}{3} \sigma_c \sigma_s + p(\sigma_c - \sigma_s), \quad (2)$$

где  $s_r$ ,  $s_z$ ,  $\tau_{rz}$  — радиальная, осевая и касательная компоненты девиатора напряжений;  $\sigma_c$ ,  $\sigma_s$  — пределы прочности бетона при одноосном сжатии и одноосном растяжении соответственно.

После разрушения предполагалось, что бетон ведет себя как упруго-пластическое изотропно упрочняющееся тело с физико-механическими свойствами гранулированной среды [28, 29]. Сопротивление сдвиговым деформациям такой среды во много раз меньше, чем в бетоне до разрушения, и она не может сопротивляться растягивающим напряжениям. Для разрушенного бетона используется условие пластичности Мизеса — Шлейхера [28] с зависимостью предела текучести  $\sigma_Y$  от давления  $p$  в виде

$$\sigma_Y(p) = \sigma_{Y0} + \psi p \left( 1 + \frac{\psi p}{\sigma_{Y\max} - \sigma_{Y0}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{Y0}$  — сдвиговая прочность разрушенного бетона при нулевом среднем напряжении, являющаяся аналогом начального сцепления среды в условии Кулона — Мора [30];  $\psi$  — величина, выступающая в качестве аналога коэффициента внутреннего трения;  $\sigma_{Y\max}$  — предел сдвиговой прочности среды при  $p \rightarrow \infty$ .

Расчеты проводились при следующих значениях параметров в соотношении (3):  $\sigma_{Y0} = 10 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_{Y\max} = 50 \text{ МПа}$ ;  $\psi = 0,7$ ; модуль сдвига для разрушенного бетона  $G_s$  задавался равным  $0,05 \text{ ГПа}$ .

Разрушенный бетон ведет себя, как гранулированная среда, которая выдерживает сжимающие и сдвиговые усилия, но не выдерживает растягивающих напряжений. Давление в разрушенном бетоне определяется с использованием той же линейной баротропной зависимости (1), что и для бетона до разрушения: