

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

© С.В. Федоров¹, В.А. Велданов¹, А.Л. Исаев¹,
А.Ю. Перфильев², Н.А. Федорова³

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² АО «ГосНИИмаш им. В.В. Бахирева», Дзержинск, Нижегородская обл.,
606002, Россия

³ 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; ρ — плотность бетона; α_0 — параметр пористости бетона, определяемый через плотность бетона ρ_0 в нормаль-

ных условиях (при нулевом давлении) как $\alpha_0 = \rho_{m0}/\rho_0$; ρ_{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 α_0 не изменяется. Плотность бетона в нормальных условиях принималась $\rho_0 = 2400 \text{ кг/м}^3$, при данном значении ρ_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 , τ_{rz} — радиальная, осевая и касательная компоненты девиатора напряжений; σ_c , σ_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 σ_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 σ_{Y0} — сдвиговая прочность разрушенного бетона при нулевом среднем напряжении, являющаяся аналогом начального сцепления среды в условии Кулона — Мора [30]; ψ — 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:

$$p = \frac{K}{\alpha} \left[\frac{\alpha \rho}{\rho_{m0}} - 1 \right], \quad (4)$$

но с тем отличием, что параметр пористости α в ней является переменной величиной [28]. Сжатие гранулированной среды с уменьшением значения α происходит при выполнении условия

$$p > \frac{Y_0}{\alpha \psi} \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^{2\psi/(3-2\psi)} - 1 \right],$$

где Y_0 — коэффициент сцепления [28].

При этом значение α определяется из уравнения

$$K \left[\frac{\alpha \rho}{\rho_{m0}} - 1 \right] = \frac{Y_0}{\psi} \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^{2\psi/(3-2\psi)} - 1 \right].$$

При разгрузке гранулированный материал не выдерживает растягивающих напряжений, поэтому увеличение пористости α происходит при нулевом давлении ($p = 0$). В соответствии с данным свойством гранулированной среды, если давление в ней, рассчитанное на основании линейной баротропной зависимости (4), оказывается отрицательным, то оно обнуляется, а параметр пористости $\alpha = \rho_{m0}/\rho$.

На границе контакта недеформируемого проникающего тела с бетоном принималось граничное условие «непроницаемости», заключающееся в обеспечении равенства скоростей точек границы и контактирующих с ними частиц бетона в проекции на местную нормаль к границе. На основании напряженного состояния бетона на границе контакта с проникающим телом определялись действующие на тело местные нормальные и касательные напряжения, интегрирование которых по поверхности контакта позволяло определить две составляющие полной силы сопротивления бетонной преграды, обусловленные этими напряжениями, и, следовательно, рассчитать динамику торможения тела.

Для проведения численных расчетов была использована программа моделирования взрывных и ударных процессов «ЭРУДИТ», разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в которой реализован вычислительный алгоритм свободных лагранжевых точек [31–33].

Перед моделированием проникания в бетон макетов ударников была проведена серия тестовых расчетов, результаты которых сопоставлялись с известными экспериментальными данными по прониканию ударников в бетонные преграды. Цель проведения тестовых расчетов — подбор параметров σ_c , σ_s в критерии разрушения бетона Баландина (2).

Авторами [34] были проведены эксперименты по прониканию в бетон монолитных стальных цилиндрических стержней-ударников диаметром 20,3 мм с оживальной формой головной части (высотой 33,7 мм) в широком диапазоне скоростей взаимодействия — от 400 до 1200 м/с. Ударники изготавливались из стали 4340 (твердостью HRC = 45) и стали AerMet (твердостью HRC = 53). Масса ударников составляла 0,478 кг при их удлинении (отношении полной длины к диаметру), равном 10. Выбравшиеся для различных скоростей взаимодействия толщины бетонных преград обеспечивали полное торможение ударников в преграде с отсутствием сквозного пробития. По результатам предварительных испытаний в статических условиях прочностные свойства бетона характеризовались прочностью на сжатие 58,4 МПа. При проведении экспериментов контролировалась величина угла атаки ударников непосредственно перед началом их взаимодействия с преградой, которая не превысила 1°.

Внешний вид ударников после их проникания в бетон (рис. 1) позволил установить, что у ударников отсутствуют деформации, но наблюдается незначительное уменьшение их массы вследствие абляции, которое составляло примерно от 1,0 до 4,5 % в зависимости от скорости взаимодействия.

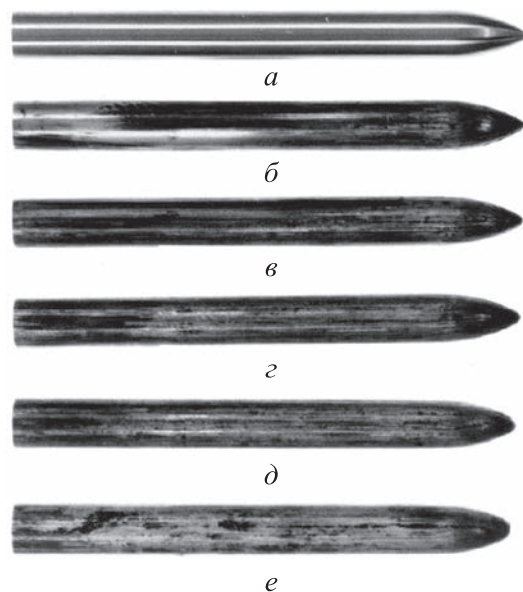


Рис. 1. Вид ударников в исходном состоянии (*a*) и после их проникания в бетонную преграду со скоростями 442 м/с (*б*), 610 м/с (*в*), 815 м/с (*г*), 1009 м/с (*д*), 1162 м/с (*е*) по данным экспериментов [34]

Анализ экспериментальных данных [34] подтверждает обоснованность гипотезы о недеформируемости ударников, использовавшейся при численном моделировании проникания в бетон, по крайней мере,

до скоростей взаимодействия на уровне 1200 м/с. По результатам численного моделирования применительно к условиям экспериментов сопоставлялись расчетные и экспериментальные значения результирующей глубины проникания L ударников в бетон при различных скоростях взаимодействия v_0 . На основе данного сопоставления для параметров в критерии разрушения Баландина (2) были приняты значения $\sigma_c = 150$ МПа, $\sigma_s = 125$ МПа. Результаты численных расчетов применительно к условиям экспериментов [34] при указанных значениях параметров σ_c , σ_s проиллюстрированы на рис. 2 и 3.

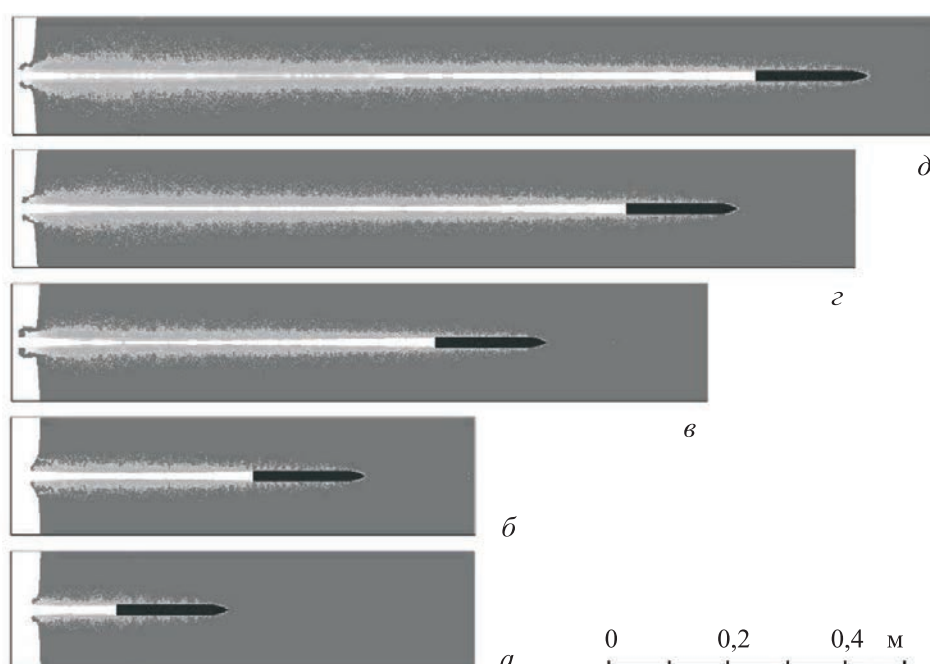


Рис. 2. Результаты численного моделирования проникания ударников в бетон применительно к условиям экспериментов при начальных скоростях взаимодействия 442 м/с (а), 610 м/с (б), 815 м/с (в), 1009 м/с (г), 1162 м/с (д)

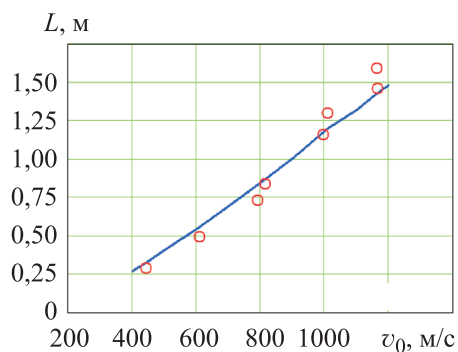


Рис. 3. Зависимость значений глубины проникания L ударников в бетон от скорости взаимодействия v_0 по данным экспериментов [34] (○) и по результатам численного моделирования (—)

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями [34] результирующей глубины проникания ударников в бетон при выбранных значениях параметров σ_c , σ_s в критерии разрушения бетона не превышает 10 % во всем диапазоне реализованных скоростей взаимодействия (см. рис. 3).

Еще один тестовый расчет был проведен применительно к условиям эксперимента, в котором использовался ударник диаметром 20 мм и массой 122,3 г с головной частью, представляющей собой комбинацию нескольких конусов с уменьшающимися по мере удаления от вершины углами раствора (рис. 4, а). Общая длина данного ударника составляла 95,7 мм при длине головной части 48,7 мм. При начальной скорости $v_0 = 1064$ м/с глубина проникания рассматриваемого ударника в бетон составила не менее 0,415 м (при проникании ударника на стальной арматуре у него отломился нос головной части). Результаты численного моделирования проникания этого ударника в бетон при указанной скорости взаимодействия проиллюстрированы на рис. 4, б. Расчеты были проведены при тех же значениях параметров разрушения бетона σ_c , σ_s , которые обеспечили близкое соответствие расчетных данных по глубине проникания с данными экспериментов [34] (см. рис. 3). Расчетное значение глубины проникания ударника, представленного на рис. 4, а, составило $L = 0,435$ м, что хорошо согласуется с полученным экспериментально.

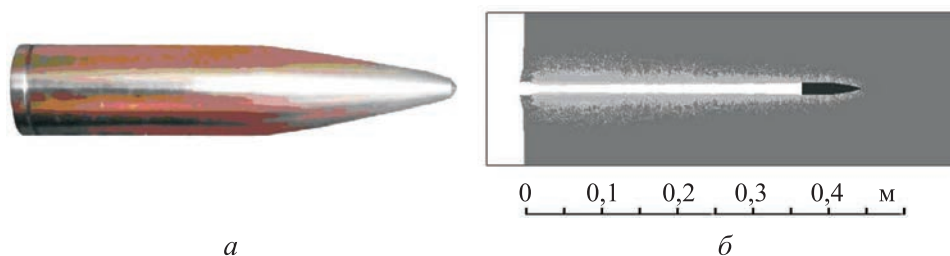


Рис. 4. Ударник с мультиконической головной частью (а) и результаты численного моделирования его проникания в бетонную преграду при начальной скорости 1064 м/с (б)

По результатам проведенных тестовых расчетов проникания в бетон ударников с различной формой головной части и при разных скоростях взаимодействия, согласно проанализированным экспериментальным данным, для параметров в критерии разрушения бетона Баландина (2) были приняты значения $\sigma_c = 150$ МПа, $\sigma_s = 125$ МПа. Эти значения использовались в дальнейшем при численном моделировании проникания в бетонную преграду макетов ударников, разгоняемых в стволе баллистической установки с использованием отделяемого поддона.

Моделирование без учета влияния поддона. Форма и размеры макетов ударников, размещаемых в отделяемом поддоне, для которых проводилось численное моделирование проникания в бетонную преграду, приведены на рис. 5. Первоначально моделировалось проникание макетов ударников без учета влияния поддона. Начальная скорость макетов ударников полагалась $v_0 = 1200$ м/с. Задаваемая толщина бетонной преграды выбиралась таким образом, чтобы преграда могла считаться полубесконечной. В расчетах были рассмотрены три варианта стальных макетов ударников диаметром 18 мм, различающихся параметрами головной части (рис. 5, а), и макет ударника диаметром 14 мм из тяжелого сплава ВНЖ [35] (рис. 5, б). Массы всех макетов ударников принимались равными 125 г.

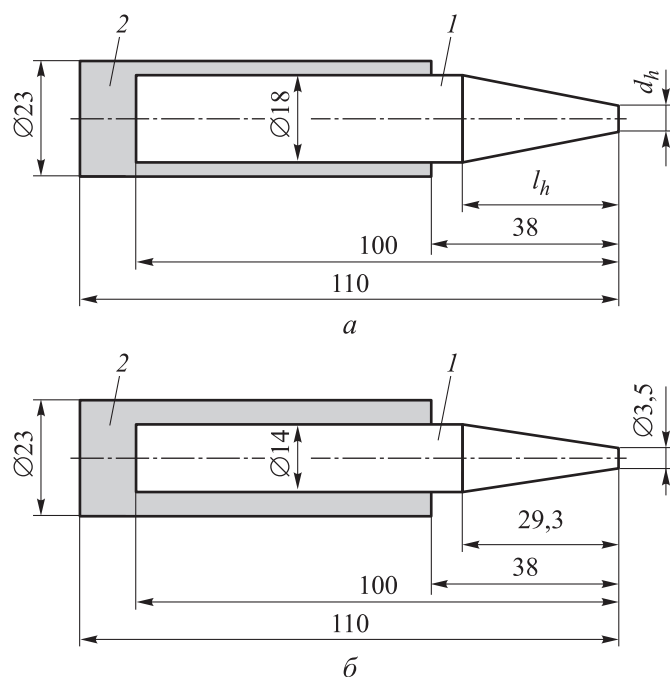


Рис. 5. Макеты ударников диаметром 18 мм (а) и 14 мм (б), размещенных в отделяемом поддоне:
1 — макет ударника; 2 — поддон

Головные части всех макетов ударников имели коническую форму с наличием или отсутствием носового притупления. Параметры головных частей для макетов ударников диаметром 18 мм (высота l_h и диаметр притупления d_h) приведены в табл. 1. При анализе результатов проведенных расчетов для макета ударника диаметром 14 мм из сплава ВНЖ (см. рис. 5, б) будем использовать условное обозначение D14-3,5, а для стальных макетов ударников диаметром 18 мм с различными головными частями (см. рис. 5, а) — условные обозначения, указанные в табл. 1.

Параметры головной части макетов ударников диаметром 18 мм

l_h , мм	d_h , мм	Условное обозначение
25,5	0	D18-0
30,5	5	D18-5
34,5	7	D18-7

Положение макетов ударников диаметром 18 мм в бетонной преграде и характер разрушения преграды на момент полного затормаживания макетов и окончания проникания проиллюстрированы на рис. 6. Четко выделяются зоны сплошного разрушения бетона вокруг пробитого макетом ударника канала, в которых наблюдается полное превращение бетона в гранулированную среду, и зоны его частичного разрушения, где сохраняются фрагменты неразрушенного бетона небольших размеров в сетке линий трещин, заполненных гранулированной средой. При этом диаметральный размер зоны сплошного

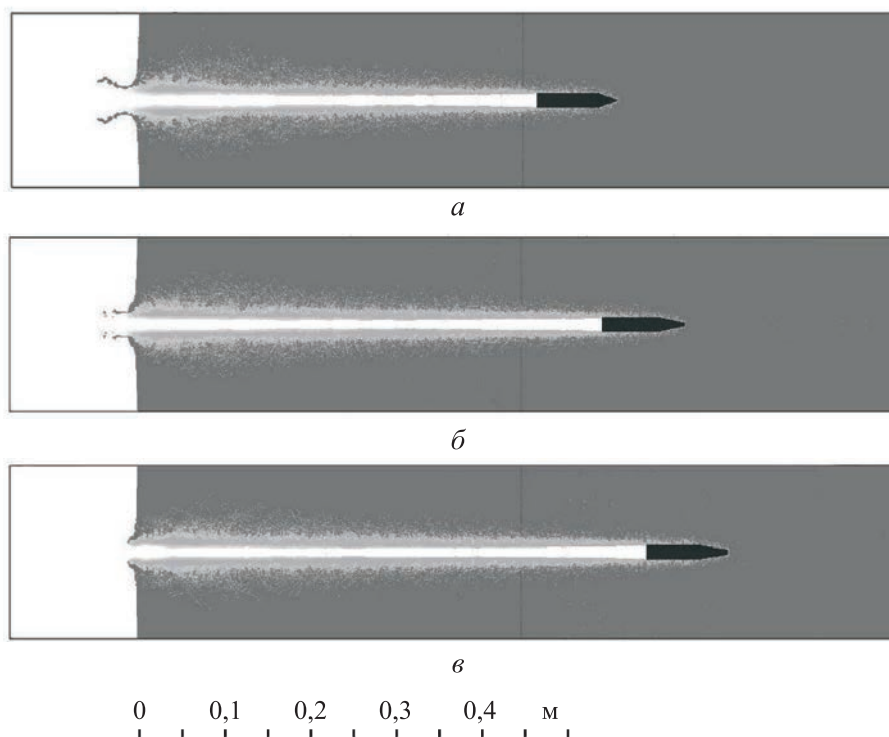


Рис. 6. Результирующая глубина проникания в бетонную преграду макетов ударников диаметром 18 мм:
a — D18-0; *б* — D18-5; *в* — D18-7

разрушения бетона, окружающей пробитый канал, уменьшается примерно от трех диаметров макета ударника на входном участке канала до полутора диаметров на его конечном участке. На рис. 6 также видно, что поперечный размер зоны сплошного разрушения бетона вокруг входного участка канала, пробитого макетом ударника *D18-7* (рис. 6, в), несколько меньше, чем при проникании макетов ударников *D18-0* и *D18-5* (рис. 6, а, б).

Результирующая глубина проникания макета ударника *D18-5* с диаметром носового притупления 5 мм (35,2 диаметра макета) оказалась на 13 % больше глубины проникания макета ударника *D18-0* без притупления головной части (табл. 2). Дальнейшее увеличение диаметра носового притупления до 7 мм у макета ударника *D18-7* привело к возрастанию глубины проникания еще на 8 % (до 38 диаметров макета) по отношению к макету ударника *D18-5* с пятимиллиметровым притуплением.

Таблица 2

Параметры проникания в бетон макетов ударников диаметром 18 мм

Условное обозначение	Результирующая глубина проникания, м	Максимальная перегрузка
<i>D18-0</i>	0,560	$1,9 \cdot 10^5$
<i>D18-5</i>	0,634	$1,5 \cdot 10^5$
<i>D18-7</i>	0,684	$1,3 \cdot 10^5$

Положительным образом наличие притупления головной части отразилось и на величине максимальной перегрузки, которую испытывали ударники диаметром 18 мм при проникании в бетон (см. табл. 2). Ее снижение у ударника *D18-5* составило 21 % по отношению к ударнику *D18-0*. Переход от головной части с пятимиллиметровым притуплением у ударника *D18-5* к головной части с семимиллиметровым притуплением у ударника *D18-7* обеспечил дополнительное снижение максимальной перегрузки еще на 13 %.

Заслуживающую внимания информацию о динамике проникания в бетон макетов ударников диаметром 18 мм с различными головными частями дает сравнительный анализ временных зависимостей перегрузки таких макетов, которая пропорциональна силе сопротивления бетонной преграды (рис. 7). Для макета ударника без притупления головной части *D18-0* перегрузка и, соответственно, сила сопротивления прониканию максимальны на начальной стадии движения в преграде и монотонно снижаются до момента, когда скорость макета ударника уменьшается от 1200 м/с примерно до 500 м/с, после чего они стабилизируются приблизительно на одном уровне вплоть до скорости 100...150 м/с. При этом перегрузка на стадии стабилизации (около $1,0 \cdot 10^5$) примерно вдвое ниже максимальной (рис. 7, а). Стадия

неизменности перегрузки с сохранением ее значения на уровне $1,0 \cdot 10^5$ в диапазоне скоростей проникания от 500 до 100...150 м/с отмечается на временных зависимостях перегрузки для всех рассмотренных макетов ударников диаметром 18 мм. Однако при наличии у макета ударника притупления головной части тенденция к выравниванию перегрузки на том же уровне $1,0 \cdot 10^5$ за счет ее снижения в начале проникания проявляется и на предшествующем этапе монотонного уменьшения перегрузки в диапазоне скоростей проникания выше 500 м/с. Для макета ударника D18-5 с диаметром притупления головной части 5 мм превышение максимальной перегрузки над стабилизирующей перегрузкой составляет уже только 50 % (рис. 7, б), а при семимиллиметровом притуплении головной части у макета ударника D18-7 оно сокращается до 30 % (рис. 7, в).

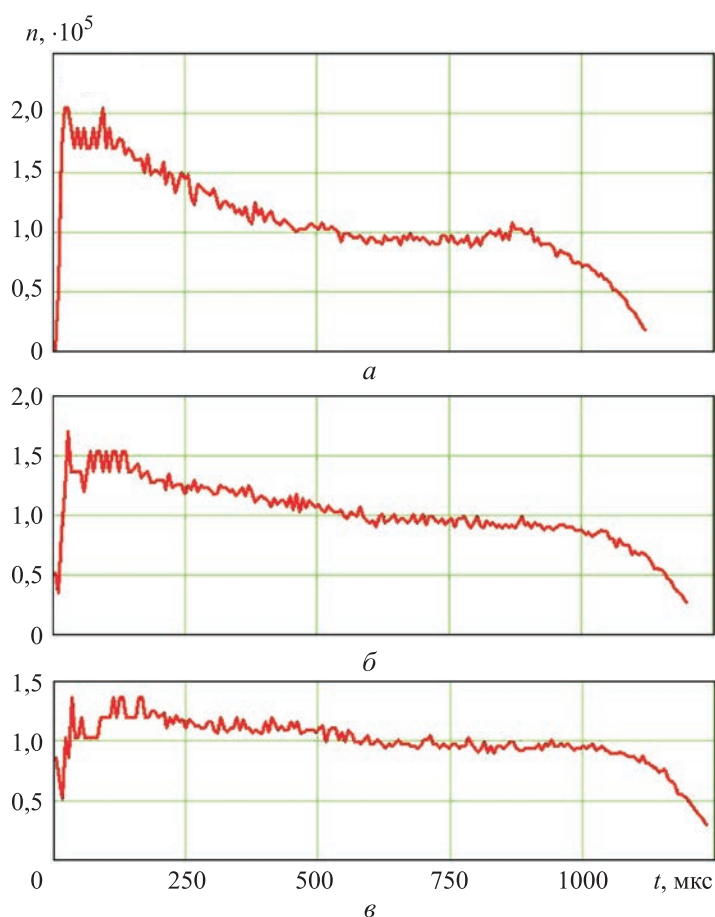


Рис. 7. Перегрузка, испытываемая макетами ударников диаметром 18 мм при проникании в бетонную преграду:
а — D18-0; б — D18-5; в — D18-7

Характер изменения перегрузки для макета ударника *D18-7* с ее близостью к неизменному значению в течение всего процесса проникания позволяет предположить, что форма головной части данного макета ударника близка к оптимальной (обеспечивающей наибольшую глубину проникания). При этом некоторые резервы увеличения глубины проникания, видимо, еще существуют и могут быть реализованы при небольшом дополнительном увеличении диаметра притупления головной части, обеспечивающем лучшее выполнение условия постоянства перегрузки во всем диапазоне скоростей проникания.

Очевидно, положительное влияние притупления головной части на глубину проникания макетов ударников диаметром 18 мм, зафиксированное в расчетах, связано с реализуемым им кавитирующим эффектом, за счет которого частицы разрушенного бетона в области контакта с притуплением, где действует высокое давление, приобретают значительный импульс движения в радиальном направлении от оси макета ударника. Это приводит к уменьшению контактных напряжений на конической поверхности головной части макетов ударников, причем в ее области, примыкающей к притуплению, эти напряжения могут вообще отсутствовать ввиду возникновения зазора между материалом преграды и макетом ударника. Очевидно также, что с увеличением диаметра притупления одновременно с уменьшением сопротивления прониканию на конической поверхности головной части макета ударника будет нарастать сопротивление на самом притуплении, где действуют максимальные контактные напряжения. Следовательно, должен существовать оптимальный диаметр притупления, при котором обеспечивается минимум результирующей силы сопротивления.

Результаты численного моделирования проникания в бетон макета ударника *D14-3,5* диаметром 14 мм из тяжелого сплава ВНЖ проиллюстрированы на рис. 8. Результирующая глубина его проникания (рис. 8, *а*) составила 1,118 м (80 диаметров макета ударника) при максимальной перегрузке $0,85 \cdot 10^5$. Характер изменения перегрузки в процессе проникания остается таким же, как и для макетов ударников диаметром 18 мм, т. е. наблюдается стадия стабилизации ее значения на уровне примерно $0,6 \cdot 10^5$ в диапазоне скоростей проникания от 700 до 100...150 м/с с предшествующей стадией монотонного снижения перегрузки по мере торможения макета ударника (рис. 8, *б*).

По незначительности превышения максимальной перегрузки в начале проникания над ее стабилизировавшимся значением (в пределах 25 %) для макета ударника *D14-3,5*, как и для макета ударника *D18-7*, может быть сделан вывод о близости формы его головной части к оптимальной, обеспечивающей максимум глубины проникания (см. рис. 8, *б*).

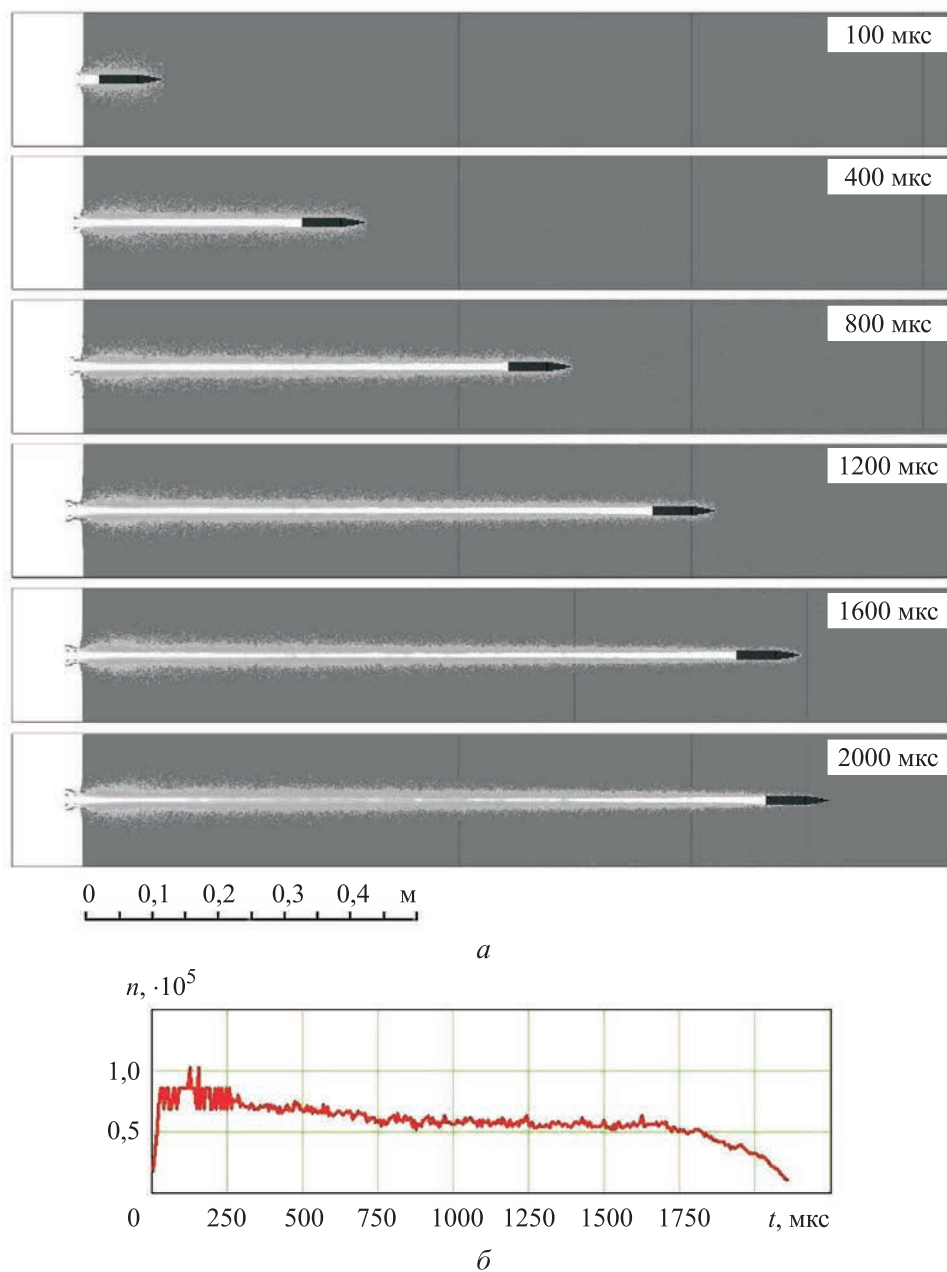


Рис. 8. Положение в бетонной преграде макета ударника *D14-3,5* в различные моменты его проникания (а) и изменение испытываемой им перегрузки (б)

Моделирование с учетом влияния поддона. При численном моделировании проникания в бетон макетов ударников с учетом их размещения в отделяемом поддоне (см. рис. 5), использовавшемся для их разгона в стволе баллистической установки, поддоны, как и макеты ударников, предполагались недеформируемыми. Их наружный

диаметр для всех вариантов макетов ударников составлял 23 мм. Масса поддона полагалась равной 34 г для стальных макетов ударников диаметром 18 мм (см. рис. 5, *а*) и 38 г для макета ударника диаметром 14 мм из тяжелого сплава ВНЖ (см. рис. 5, *б*).

Наличие трения между макетом ударника и поддоном по наружной поверхности макета не учитывалось, так что препятствий для их свободного разделения в процессе проникания в случае возникновения предпосылок для такового не возникало. Условием реализации разделения являлось превышение абсолютной величины ускорения торможения поддона под действием приложенной к нему силы сопротивления бетонной преграды над абсолютной величиной ускорения торможения макета ударника под действием приложенной к нему силы сопротивления. До момента выполнения указанного условия движение макета ударника и поддона предполагалось совместным и происходящим с одним и тем же ускорением торможения, определяемым суммой сил сопротивления, действующих на макет ударника и поддон. После полного разделения макета ударника и поддона учитывалась возможность затекания гранулированной среды (в которую превращался разрушенный бетон) в полость поддона, а также возможность ее «подталкивающего» воздействия на донный срез макета ударника.

Положение макетов ударников диаметром 18 мм и поддонов в бетонной преграде, а также характер разрушения преграды на момент времени, соответствующий полному затормаживанию макетов ударников с прекращением их проникания, проиллюстрированы на рис. 9. Сравнение случая проникания в бетон макетов ударников диаметром 18 мм без поддона, представленного на рис. 6, и соответствующего прониканию тех же макетов ударников в поддоне (см. рис. 9) показывает, что наличие поддона приводит к некоторому увеличению зоны полностью разрушенного бетона вокруг канала проникания на его начальном участке. При этом в области частичного разрушения бетона появляются протяженные трещиноподобные образования из разрушенного бетона, ориентированные под углом примерно 45° к оси канала проникания.

В процессе проникания макетов ударников диаметром 18 мм в поддонах наблюдается их полное разделение, занимающее довольно длительный промежуток времени, так что полная глубина проникания поддонов оказывается сопоставимой с глубиной проникания макетов ударников, уступая последней для всех вариантов макетов ударников не более чем на 30 %. После отделения поддона от макета ударника происходит затекание гранулированной среды, являющейся продуктом разрушения бетона, в открывшуюся полость поддона, что резко интенсифицирует процесс его торможения. Наиболее контрастно этот эффект проявился для макета ударника *D18-7*, приведя

к наибольшему отставанию поддона по результирующей глубине проникания от макета (рис. 9, в) по сравнению с двумя другими вариантами макетов ударников *D18-0* и *D18-5* (рис. 9, а, б). Для макета ударника *D18-0* ввиду достаточно позднего отделения поддона существенного «захвата» последним гранулированной среды до момента его полного останова вообще не успело произойти (см. рис. 9, а).

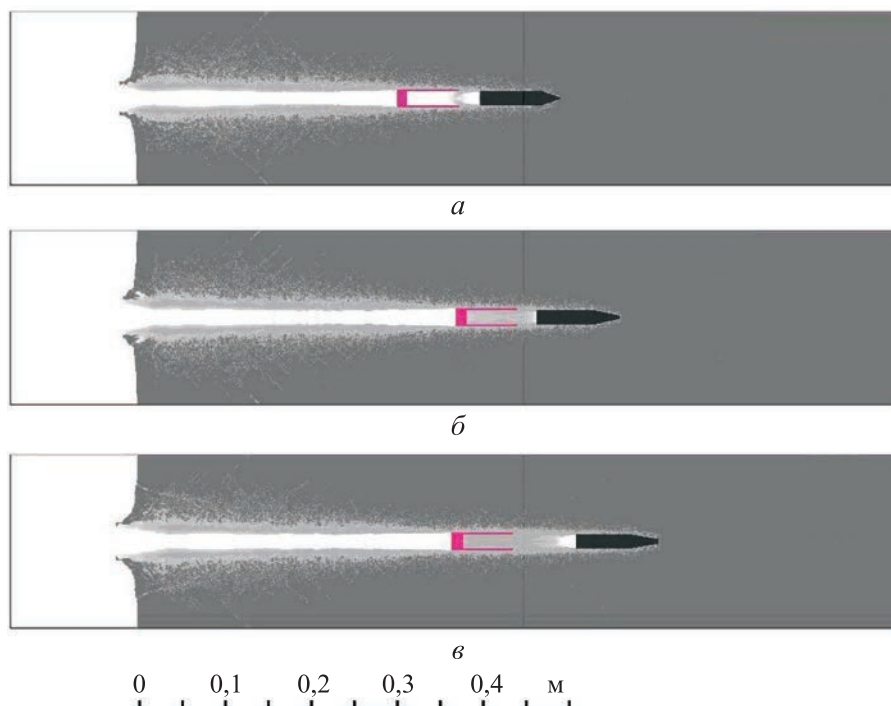


Рис. 9. Результирующая глубина проникания в бетонную преграду макетов ударников диаметром 18 мм с учетом влияния отделяемого поддона:
а — *D18-0*; *б* — *D18-5*; *в* — *D18-7*

Обобщающие данные по прониканию в бетон макетов ударников диаметром 18 мм в поддонах приведены в табл. 3. Как ни удивительно, но наличие поддона с массой, составлявшей около 27 % массы макетов ударников и способной по первоначальным представлениям сыграть роль наседающей массы с соответствующим увеличением результирующей глубины проникания макетов ударников, привело, напротив, к ее снижению по сравнению со случаем проникания тех же макетов ударников без поддонов (см. табл. 2).

Уменьшение глубины проникания макетов ударников диаметром 18 мм в поддонах по сравнению с ранее рассмотренным случаем его отсутствия составляло для разных вариантов макетов примерно одну и ту же величину в диапазоне от 11,5 до 12,5 % (см. табл. 2, 3). При проникании макетов ударников в поддонах также произошло

увеличение максимальной перегрузки, испытываемой макетами (см. табл. 3, рис. 10), составившее для разных вариантов макетов ударников от 5 до 15 % по сравнению со случаем отсутствия поддона (см. табл. 2, рис. 7). Характерно, что прирост максимальной перегрузки был тем сильнее, чем больше диаметр притупления у головной части макета ударника.

Таблица 3

Параметры проникания в бетон макетов ударников диаметром 18 мм, размещенных в отделяемом поддоне

Условное обозначение	Результирующая глубина проникания макета ударника, м	Максимальная перегрузка макета ударника	Результирующая глубина проникания поддона, м
D18-0	0,490	$2,0 \cdot 10^5$	0,370
D18-5	0,558	$1,7 \cdot 10^5$	0,442
D18-7	0,605	$1,5 \cdot 10^5$	0,433

Для объяснения неожиданно обнаруженного эффекта отрицательного влияния поддона на глубину проникания макетов ударников в бетон был проведен дополнительный сравнительный анализ начальной стадии их проникания в отсутствие и при наличии поддона. Результаты этого анализа иллюстрируются на примере макета ударника D18-5, приведенного на рис. 11, где на моменты времени 100 и 200 мкс от начала проникания показано положение макета в преграде для обоих случаев. На начальных стадиях проникания поддон испытывает заметно более высокую перегрузку, чем макет ударника (см. рис. 10). Это означает, что действующая на передний плоский торец поддона сила сопротивления бетонной преграды в соотношении с массой поддона приводит к более резкому торможению по сравнению с макетом ударника. В результате сразу после начала проникания поддон начинает сдвигаться назад относительно макета ударника, прекращая свое наседающее влияние на него (см. рис. 11). При этом за счет воздействия поддона происходят уплотнение и повышение давления в слое полностью разрушенного бетона (гранулированной среды), находящемся перед поддоном и контактирующем с незакрытой им частью наружной цилиндрической поверхности макета ударника. Как следствие, происходит увеличение касательных напряжений на этой части цилиндрической поверхности и, соответственно, общей силы сопротивления бетонной преграды, действующей на макет ударника.

На начальной стадии проникания макета ударника D18-5 в отсутствие поддона (см. рис. 11) контакт разрушенного бетона с цилиндрической поверхностью макета отсутствует вследствие интенсивного

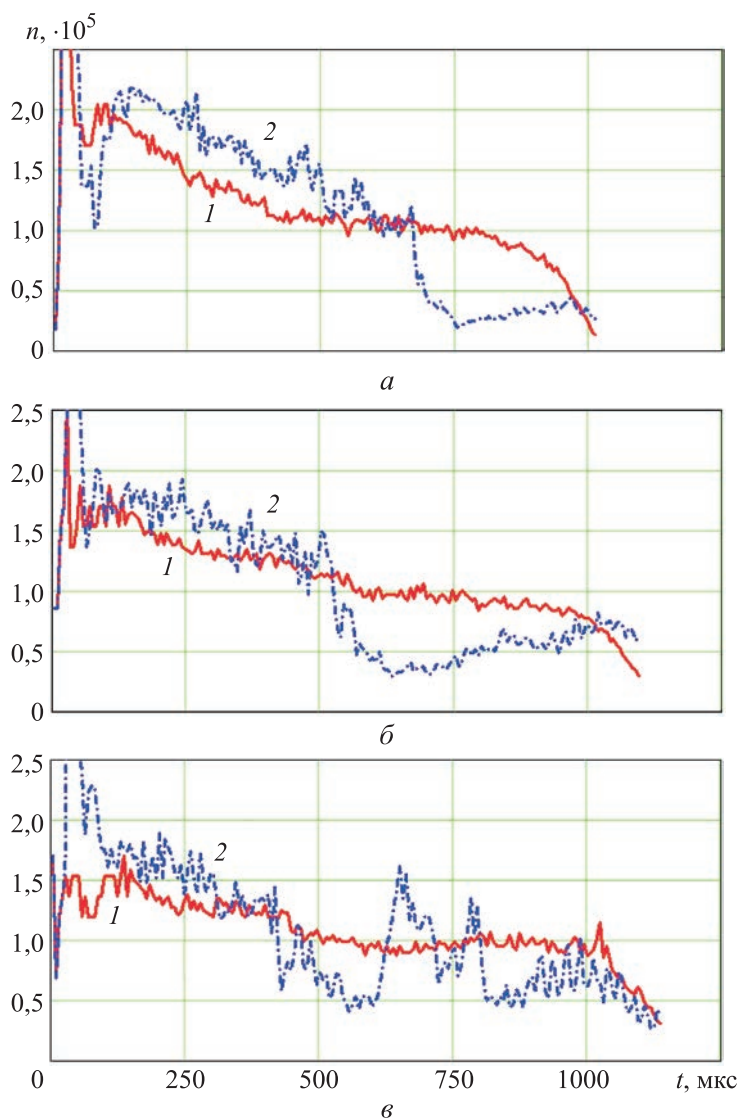


Рис. 10. Перегрузка, испытываемая макетами ударников диаметром 18 мм (1) и используемыми для их разгона отделяемыми поддонами (2), при их совместном проникании в бетонную преграду:

a — D18-0; *б* — D18-5; *в* — D18-7

«раздвигания» бетона головной частью макета ударника (между цилиндрической частью макета и разрушенным бетоном прослеживается небольшой зазор). Следовательно, при этом полностью отсутствует и добавка к силе сопротивления, обусловленная действием касательных напряжений на цилиндрической части поверхности макета ударника. Иная картина наблюдается на начальной стадии проникания того же макета ударника, размещенного в отделяемом поддоне. Зазор между открытой частью цилиндрической поверхности макета

ударника перед поддоном и разрушенным бетоном исчезает, и за счет контакта между ними «включается» действие на макет дополнительных касательных напряжений, увеличивающих силу сопротивления. Причем высокий уровень этих касательных напряжений обеспечивается поджатием создающего их слоя разрушенного бетона движущимся поддоном.

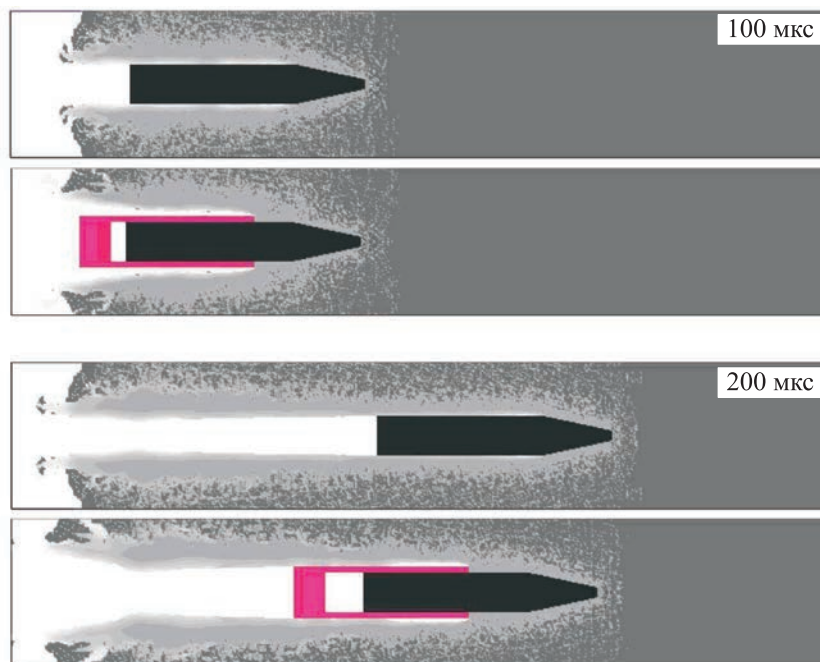


Рис. 11. Начальные стадии проникания в бетон макета ударника D18-5 в отсутствие и при наличии поддона

В качестве подтверждения рассмотренного механизма дополнительного торможения макетов ударников при их проникании в бетон совместно с поддоном могут выступать временные зависимости составляющей F_{τ} общей силы сопротивления бетонной преграды, обусловленной действием на поверхности контакта макета ударника с преградой касательных напряжений, показанные на рис. 12 (значения F_{τ} отнесены к площади миделя S_m макетов ударников). Видно, что величина F_{τ}/S_m на начальной стадии проникания всех вариантов макетов ударников диаметром 18 мм, размещенных в поддонах, заметно выше, чем в случае проникания тех же макетов без поддонов. Это превышение сохраняется до тех пор, пока не происходит полного отделения поддона от макета ударника с прекращением его поджимающего воздействия на слой разрушенного бетона, контактирующий с цилиндрической частью макета ударника.

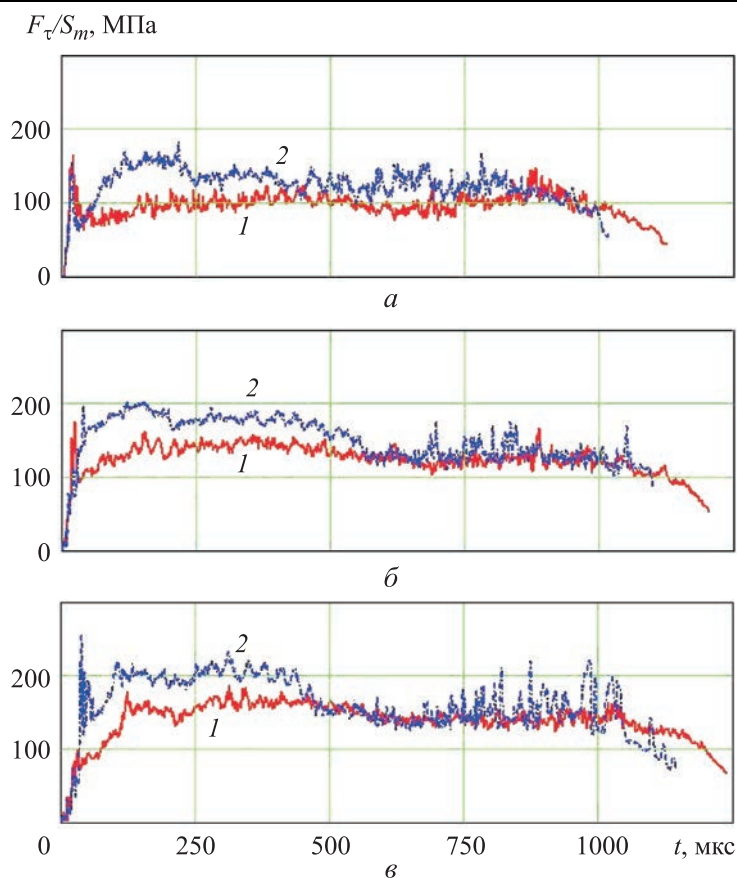


Рис. 12. Временные зависимости составляющей силы сопротивления бетонной преграды от действия касательных напряжений на поверхности макетов ударников диаметром 18 мм при их проникании в отсутствие (1) и при наличии (2) отделяемого поддона:

a — D18-0; *б* — D18-5; *в* — D18-7

Находит свое объяснение и отмечавшийся выше факт, что относительный прирост максимальной перегрузки при совместном с поддоном проникании в бетон макетов ударников диаметром 18 мм был выше в вариантах с притуплением головной части (см. табл. 2, 3). Как указывалось ранее, положительное влияние притупления головной части на динамику торможения макетов ударников связано с кавитационным эффектом, за счет которого уменьшаются контактные напряжения и, соответственно, сопротивление прониканию на коническом участке головной части, следующем за притуплением. Проникание макетов ударников вместе с поддоном приводит к поджатию разрушенного бетона (гранулированной среды) с увеличением контактных напряжений не только в области цилиндрической части макета ударника, но и в области его головной части, что в случае наличия у нее притупления нивелирует обеспечиваемый им кавитационный эффект.

Результаты численного моделирования совместного с поддоном проникания в бетон макета ударника $D14-3,5$ диаметром 14 мм из тяжелого сплава ВНЖ проиллюстрированы на рис. 13 и 14. Результаты глубины проникания составили 0,992 м для макета ударника и 0,303 м для поддона. Максимальная перегрузка макета ударника в процессе проникания достигала $(1,0...1,1) \cdot 10^5$. В качественном отношении влияние поддона на проникание макета ударника $D14-3,5$ оказалось таким же отрицательным, как и для макетов ударников диаметром 18 мм. Снижение глубины его проникания при размещении в поддоне составило 11,3 % по сравнению со случаем отсутствия поддона (см. рис. 8, а), при этом максимальная перегрузка возросла почти на 23 %.

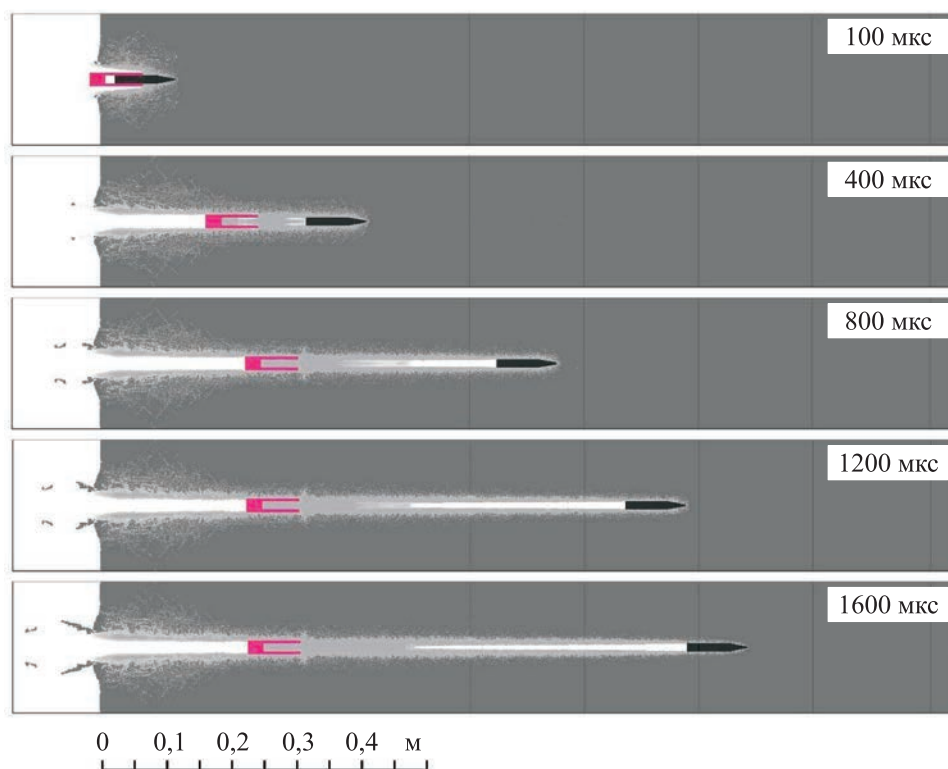


Рис. 13. Результат численного моделирования проникания макета ударника $D14-3,5$ в бетонную преграду в отделяемом поддоне

Отличительной особенностью проникания макета ударника $D14-3,5$ в поддоне по сравнению с прониканием в поддоне макетов ударников диаметром 18 мм является заметное снижение глубины проникания поддона в сопоставлении с глубиной проникания макета ударника. В случае макета ударника $D14-3,5$ глубина проникания поддона составила только чуть более 30 % глубины проникания макета

(см. рис. 13), в то время как для макетов ударников диаметром 18 мм соотношение этих глубин было на уровне 0,7. Последнее обстоятельство, очевидно, связано с тем, что при переходе к макету ударника меньшего диаметра при неизменном наружном диаметре поддона возросла площадь переднего торца поддона, контактирующего с бетоном и определяющего силу его сопротивления движению поддона до момента его полного отделения от макета ударника.

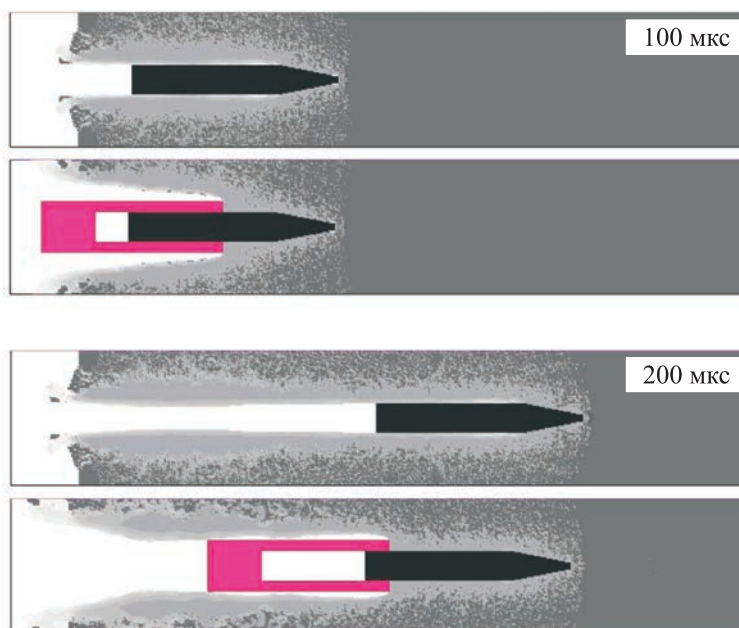


Рис. 14. Начальные стадии проникания в бетон макета ударника *D14-3,5* в отсутствие и при наличии поддона

После разделения макета ударника и поддона последний полностью заполняется разрушенным бетоном и вынужден «толкать» толстый его слой протяженностью до 0,18 м перед собой вдоль пробитого макетом ударника канала, что также способствует быстрому торможению поддона (см. рис. 13). На удалении свыше 0,18 м от остановившегося поддона канал, пробитый макетом ударника, становится вновь свободным от разрушенного бетона.

Анализ начальных стадий проникания макета ударника *D14-3,5* в отсутствие и при наличии поддона (см. рис. 14) позволяет выявить причину отрицательного влияния поддона на динамику проникания макета ударника, заключающегося в снижении результирующей глубины проникания макета и увеличении испытываемой им максимальной перегрузки. Эта причина остается той же, что и для макетов ударников диаметром 18 мм. За счет движения поддона до момента его отделения от макета ударника поджимается контактирующий

с макетом слой разрушенного бетона (гранулированной среды), что приводит к увеличению действующих на макет ударника контактных касательных напряжений и, соответственно, силы сопротивления прониканию.

Заключение. По результатам численного моделирования проникания в полубесконечную бетонную преграду макетов ударников диаметром 14 и 18 мм при их начальной скорости 1200 м/с, проводившегося в двумерной осесимметричной постановке в предположении недеформируемости макетов и поддонов, могут быть сделаны следующие основные выводы.

Глубина проникания в бетон для трех вариантов стальных макетов ударников диаметром 18 мм с различной формой головной части в отсутствие поддона составила от 0,56 до 0,684 м (примерно 31...38 диаметров макета) при максимальной перегрузке от $1,3 \cdot 10^5$ до $1,9 \cdot 10^5$. Положительное влияние на динамику проникания макетов ударников, заключающееся в увеличении глубины проникания и снижении максимальной перегрузки, оказывает наличие притупления у головной части, реализующее кавитационный эффект. По результатам анализа изменения перегрузки различных вариантов макетов ударников диаметром 18 мм в процессе проникания существуют основания для того, чтобы сделать предположение о том, что в качестве критерия близости формы головной части макета ударника к оптимальной, обеспечивающей максимум глубины проникания, может выступать один и тот же уровень перегрузки в течение всего процесса проникания. Глубина проникания в бетон макета ударника диаметром 14 мм из тяжелого сплава ВНЖ составила в отсутствие поддона 1,118 м (примерно 80 диаметров макета) при максимальной перегрузке $0,85 \cdot 10^5$.

Наличие поддона, в котором размещается макет ударника, как для макетов диаметром 18 мм с различной формой головной части, так и для макета диаметром 14 мм, отрицательно отразилось на динамике их проникания в бетон, приведя к снижению глубины проникания при увеличении максимальной перегрузки. Для всех рассмотренных макетов ударников снижение глубины проникания в бетон при их размещении в поддонах лежало в диапазоне 11,3...12,5 %. Причиной зафиксированного эффекта является то, что за счет движения поддона до момента его отделения от макета ударника поджимается контактирующий с макетом слой разрушенного бетона (гранулированной среды). Это приводит к увеличению действующих на макет ударника контактных касательных напряжений и, соответственно, силы сопротивления прониканию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баженов Ю.М. *Бетон при динамическом нагружении*. Москва, Стройиздат, 1970, 271 с.
- [2] Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. *Теория пластичности бетона и железобетона*. Москва, Стройиздат, 1974, 316 с.
- [3] Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. *Действие средств поражения и боеприпасов*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012, 408 с.
- [4] Yankelevsky D.Z. Local response of concrete slabs to low velocity missile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, vol. 19, no. 4, pp. 331–343.
- [5] Дубинский А.В. Обзор некоторых нетрадиционных приложений инженерной теории высокоскоростного проникания. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2019, № 3, с. 125–139.
- [6] Jinzhu L., Zhongjie L., Hongsong Zh., Fenglei H. Perforation experiments of concrete targets with residual velocity measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 1–6.
- [7] Велданов В.А., Даурских А.Ю., Дудик Д.Е., Исаев А.Л., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Экспериментальные и теоретические исследования влияния механических свойств бетона и бетонных конструкций на характер их деформирования при проникании скоростного ударника. *Известия вузов. Физика*, 2013, т. 56, № 7–3, с. 26–28.
- [8] Teland J.A., Sjol H. Penetration into concrete by truncated projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, pp. 447–464.
- [9] Dancygier A.N., Yankelevsky D.Z. High strength concrete response to hard projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, vol. 18, no. 6, pp. 583–599.
- [10] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 707–727.
- [11] Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2014, № 4 (84), с. 53–63.
- [12] Федоров С.В., Велданов В.А., Федорова Н.А. О возможности увеличения глубины проникания в грунтово-скальные преграды составных ударников с отстреливаемой в процессе взаимодействия хвостовой частью. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 1, с. 30–50.
- [13] Федоров С.В., Федорова Н.А. Влияние прочностных свойств грунтово-скальной преграды на глубину проникания ударников при дополнительном действии импульса реактивной тяги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 4, с. 40–56.
- [14] Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s. *Journal of Applied Mechanics*, 1986, vol. 53, no. 2, pp. 317–320.
- [15] Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Киселев Ю.Г., Кочнев Ю.В., Могилев В.А., Фатеев Ю.А. Критическая скорость при внедрении ударников с конической носовой формой в грунтовые преграды. *Сборник материалов III научной конференции Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения»*. В двух томах. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004, т. 2, с. 642–647.

- [16] Chen X.W., Fan S.C., Li Q.M. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, pp. 617–637.
- [17] Chen X.W., Li X.L., Huang F.L., Wu H.J., Chen Y.Z. Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, pp. 1119–1129.
- [18] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Analytical engineering models for predicting high speed penetration of hard projectiles into concrete shields: a review. *International Journal of Damage Mechanics*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 76–94.
- [19] Forrestal M.J., Altman B.S., Cargile J.D., Hanchak S.J. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, vol. 15, no. 4, pp. 395–405.
- [20] Li Q.M., Chen X.W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 93–116.
- [21] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. High-speed penetration modeling and shape optimization of the projectile penetrating into concrete shields. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2009, vol. 37, no. 4, pp. 538–549.
- [22] Warren T.L., Fossum A.F., Frew D.J. Penetration into low-strength (23 MPa) concrete: target characterization and simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, pp. 477–503.
- [23] Unosson M., Nilsson L. Projectile penetration and perforation of high performance concrete: experimental results and macroscopic modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, pp. 1068–1085.
- [24] Исаев А.Л., Велданов В.А. Модель упрочнения бетона при армировании. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 6, с. 34–43.
- [25] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 479–497.
- [26] Luk V.K., Forrestal M.J. Penetration into semi-infinite reinforced concrete targets with spherical and ogival nose projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, vol. 6, no. 4, pp. 291–301.
- [27] Баландин П.П. К вопросу о гипотезах прочности. *Вестник инженеров и техников*, 1937, № 1, с. 19–24.
- [28] Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Расчет прочности конструкций из бетонных и железобетонных плит при высокоскоростном ударе. *Прикладная механика и техническая физика*, 2005, т. 46, № 3, с. 165–173.
- [29] Исаев А.Л., Селиванов В.В. Численная реализация физических соотношений для упрочняющейся упругопластической среды. *Проблемы прочности*, 1989, № 5, с. 47–49.
- [30] Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов. *Прикладная математика и механика*, 1960, т. 24, № 6, с. 1057–1072.
- [31] Федоров С.В., Велданов В.А., Смирнов В.Е. Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 65–83.
- [32] Федоров С.В. Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины. *Физика горения и взрыва*, 2016, т. 52, № 5, с. 116–130.
- [33] Федоров С.В., Бабкин А.В., Велданов В.А., Гладков Н.А., Ладов С.В. О высокоскоростном проникании стержней из пористого материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2016, № 5, с. 18–32.

- [34] Frew D.J., Hanchak S.J., Green M.L., Forrestal M.J. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, vol. 21, no. 6, pp. 489–497.
- [35] Черняк Г.Б., Поварова К.Б. *Вольфрам в боеприпасах*. Москва, ЦНИИХМ, 2014, 355 с.

Статья поступила в редакцию 17.10.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Федоров С.В., Велданов В.А., Исаев А.Л., Перфильев А.Ю., Федорова Н.А. Численный анализ проникания в бетонную преграду макетов ударников с учетом влияния отделяемого поддона. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2223>

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.
e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

Велданов Владислав Антонович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. РАЕН; автор более 200 научных работ в области высокоскоростного удара и конечной баллистики.
e-mail: veldanov@bmstu.ru

Исаев Андрей Львович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 30 научных работ в области конечной баллистики и информационных технологий. e-mail: isaeval@bmstu.ru

Перфильев Андрей Юрьевич — начальник отдела АО «ГосНИИмаш им. В.В. Бахирева»; автор более 30 научных работ в области физики взрыва и конечной баллистики.

Федорова Наталья Александровна — инженер-конструктор ФГУП «ВНИИ автотоматики им. Н.Л. Духова»; автор более 30 научных работ в области конечной баллистики. e-mail: n2402f@live.ru

Numerical analysis of impactor models penetration into a concrete barrier taking into account the detachable pallet influence

© S.V. Fedorov¹, V.A. Veldanov¹, A.L. Isaev¹,
A.Yu. Perfiliev², N.A. Fedorova³

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

² Bakhirev State Research Institute of Mechanical Engineering JSC,
Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region, 606002, Russia

³ Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA),
Moscow, 127055, Russia

Numerical simulation within the framework of two-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics made it possible to analyze penetration into a semi-infinite concrete barrier with impactor models having diameter of 14 and 18 mm and initial speed of 1200 m/s. Influence of the detachable pallet used to accelerate the models in the ballistic installation barrel was both taken into account and not taken into account. Within the penetration process, the impactor models and the pallets were considered to be the absolutely rigid non-deformable bodies. The impactor model head was conical with or without a nasal blunt. Positive effect of blunting the head was established on the dynamics of penetration of the impactor models, which resulted in the increase in their penetration depth and the decrease in the maximum overload caused by the cavitation effect manifestation with the presence of blunting. When simulating penetration of the impactor models installed in a detachable pallet, a decrease was registered in the penetration depth by slightly more than 10% with an increase in the maximum overload compared to the case of penetration with a missing pallet. The negative influence reason of the pallet on the impactor models penetration was revealed. It consists in an increase in the shear stresses acting on the model contact surfaces with the adjacent layer of the destroyed concrete caused by compression of this layer by the pallet, until the pallet is completely separated from the impactor model.

Keywords: concrete barrier, impactor model, detachable pallet, high-speed penetration, penetration depth, overload, numerical simulation

REFERENCES

- [1] Bazhenov Yu.M. *Beton pri dinamicheskom nagruzhenie* [Concrete exposed to dynamic loading]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1970, 271 p.
- [2] Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. *Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona* [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974, 306 p.
- [3] Balagansky I.A., Merzhievsky L.A. *Deystvie sredstv porazheniya i boepripasov* [Destructive effects of ammunition]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2012, 408 p.
- [4] Yankelevsky D.Z. Local response of concrete slabs to low velocity missile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, vol. 19, no. 4, pp. 331–343.
- [5] Dubinsky A.V. Obzor nekotorykh netraditsionnykh prilozheniy inzhenernoy teorii vysokoskorostnogo pronikaniya [A review of some non-traditional applications of the engineering theory of high-speed penetration]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta. Mekhanika — Perm National Research Polytechnic University Mechanics Bulletin*, 2019, no. 3, pp. 125–139.

- [6] Jinzhu L., Zhongjie L., Hongsong Zh., Fenglei H. Perforation experiments of concrete targets with residual velocity measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 1–6.
- [7] Veldanov V.A., Dauriskikh A.Yu., Dudik D.E., Isaev A.L., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. Eksperimentalnye i teoreticheskie issledovaniya vliyaniya mekhanicheskikh svoystv betona i betonnykh konstruktsiy na kharakter ikh deformirovaniya pri pronikanih skorostnogo udarnika [Experimental and theoretical research on effect of mechanical properties of concrete and concrete constructions on their deformation behaviour at speed striker penetration]. *Izvestiya vuzov. Fizika — Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7–3, pp. 26–28.
- [8] Teland J.A., Sjol H. Penetration into concrete by truncated projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, pp. 447–464.
- [9] Dancygier A.N., Yankelevsky D.Z. High strength concrete response to hard projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, vol. 18, no. 6, pp. 583–599.
- [10] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 707–727.
- [11] Fedorov S.V., Fedorova N.A., Veldanov V.A. Ispolzovanie impulsa reaktivnoy tyagi dlya uvelicheniya glubiny pronikaniya issledovatel'skikh moduley v malo-prochnye gruntovye pregrady [Jet thrust impulse using for increase in research modules penetration depth into low-strength soil targets]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2014, no. 4 (84), pp. 53–63.
- [12] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Fedorova N.A. O vozmozhnosti uvelicheniya glubiny pronikaniya v gruntovo-skalnye pregrady sostavnykh udarnikov s otstrelivaemoy v protsesse vzaimodeystviya khvosotovoy chastyu [On the possibility of increasing rocky target penetration depth for compound penetrators featuring a tail assembly jettisoned at impact]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 1, pp. 30–50.
- [13] Fedorov S.V., Fedorova N.A. Vliyanie prochnostnykh svoystv gruntovo-skalnoy pregrady na glubinu pronikaniya udarnikov pri dopolnitel'nom deystvii impulsa reaktivnoy tyagi [Influence of the soil and rocky target strength properties on projectiles penetration depth with additional action of the jet thrust impulse]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2016, no. 4, pp. 40–56.
- [14] Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s. *Journal of Applied Mechanics*, 1986, vol. 53, no. 2, pp. 317–320.
- [15] Kaminsky M.V., Kopytov G.F., Kiselev Yu.G., Kochnev Yu.V., Mogilev V.A., Fateev Yu.A. Kriticheskaya skorost pri vnedrenii udarnikov s konicheskoy nosovoy formoy v gruntovye pregrady [Critical velocity at penetration of projectiles with a conic nose form into soil targets]. In: *Sbornik materialov III Nauchnoy konferentsii Volzhskogo regional'nogo tsentra PAPAN "Sovremennye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya"* [Proceedings of the III Scientific conference of the RAMAS Volga regional center "Advanced methods of design and development of missile and artillery weapons"]. In 2 vols. Sarov, RFYaC–VNIIEF Publ., 2004, vol. 2, pp. 642–647.
- [16] Chen X.W., Fan S.C., Li Q.M. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, pp. 617–637.

- [17] Chen X.W., Li X.L., Huang F.L., Wu H.J., Chen Y.Z. Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, pp. 1119–1129.
- [18] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Analytical engineering models for predicting high speed penetration of hard projectiles into concrete shields: a review. *International Journal of Damage Mechanics*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 76–94.
- [19] Forrestal M.J., Altman B.S., Cargile J.D., Hanchak S.J. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, vol. 15, no. 4, pp. 395–405.
- [20] Li Q.M., Chen X.W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 93–116.
- [21] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. High-speed penetration modeling and shape optimization of the projectile penetrating into concrete shields. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2009, vol. 37, no. 4, pp. 538–549.
- [22] Warren T.L., Fossum A.F., Frew D.J. Penetration into low-strength (23 MPa) concrete: target characterization and simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, pp. 477–503.
- [23] Unosson M., Nilsson L. Projectile penetration and perforation of high performance concrete: experimental results and macroscopic modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, pp. 1068–1085.
- [24] Isaev A.L., Veldanov V.A. Model uprochneniya betona pri armirovaniy [Model for concrete strengthening due to reinforcement]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2018, no. 6, pp. 34–43.
- [25] Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 28, pp. 479–497.
- [26] Luk V.K., Forrestal M.J. Penetration into semi-infinite reinforced concrete targets with spherical and ogival nose projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, vol. 6, no. 4, pp. 291–301.
- [27] Balandin P.P. K voprosu o gipotezakh prochnosti [On problem of strength theory]. *Vestnik inzhenerov i tekhnikov*, 1937, no. 1, pp. 19–24.
- [28] Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Yugov A.A. Raschet prochnosti konstruktivnykh iz betonnykh i zhelezobetonnykh plit pri vysokoskorostnom udare [Stress analysis of concrete and reinforced-concrete slab structures under a high-velocity impact]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 3, pp. 165–173.
- [29] Isaev A.L., Selivanov V.V. Chislennaya realizatsiya fizicheskikh sootnosheniy dlya uprochnyayusheysya uprugoplastichnoy sredy [Numerical realization of physical relations for a strain-hardening elastoplastic medium]. *Problemy prochnosti — Journal Strength of Materials*, 1989, vol. 5, pp. 47–49.
- [30] Grigoryan S.S. Ob osnovnykh predstavleniyakh dinamiki gruntov [On basic concepts in soil dynamics]. *Prikladnaya matematika i mekhanika — Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1960, vol. 24, no. 6, pp. 1057–1072.
- [31] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. Chislennyi analiz vliyaniya skorosti i prochnosti udlinennykh udarnikov iz vysokoplotnogo splava na glubinu ikh pronikaniya v stalnyuyu pregradu [Numerical analysis of high density alloys and elongated projectiles' velocity and strength effect on their penetration into a steel target]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 65–83.

- [32] Fedorov S.V. Chislennoe modelirovanie formirovaniya kumulyativnykh struy polusfericheskimi oblitsovkami degressivnoy tolschiny [Numerical simulation of the formation of shaped-charge jets from hemispherical liners of digressive thickness]. *Fizika gorenija i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 116–130.
- [33] Fedorov S.V., Babkin A.V., Veldanov V.A., Gladkov N.A., Ladov S.V. O vysokoskorostnom pronikanii sterzhney iz poristogo materiala [High-velocity penetration of porous material rods]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2016, no. 5, pp. 18–32.
- [34] Frew D.J., Hanchak S.J., Green M.L., Forrestal M.J. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, vol. 21, no. 6, pp. 489–497.
- [35] Chernyak G.B., Povarova K.B. *Volfram v boepripasakh* [Tungsten in ammunition]. Moscow, CNIKhM Publ., 2014, 355 p.

Fedorov S.V., Senior Lecturer, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 300 scientific papers in explosion physics and high-speed impact. e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

Veldanov V.A., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; Corresponding Member, RANS; author of more than 200 scientific papers in high-speed impact and terminal ballistics. e-mail: veldanov@bmstu.ru

Isaev A.L., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Computer Software and Information Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 30 scientific papers in terminal ballistics and information technology. e-mail: isaeval@bmstu.ru

Perfiliev A.Yu., Head of Department, Bakhirev State Research Institute of Mechanical Engineering JSC; author of more than 30 scientific papers in explosion physics and terminal ballistics.

Fedorova N.A., Design Engineer, Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA); author of more than 30 scientific papers in terminal ballistics. e-mail: n2402f@live.ru