

## ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ СНАРЯЖЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОНИКАНИИ УДАРНИКА В БЕТОННУЮ ПРЕГРАДУ

С.В. Федоров<sup>1</sup>

sergfed-64@mail.ru

В.А. Велданов<sup>1</sup>

vevladi@mail.ru

А.Ю. Перфильев<sup>2</sup>

andprf@yandex.ru

А.С. Смирнов<sup>2</sup>

smirnoffas@mail.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «ГосНИИмаш им. В.В. Бахирева», г. Дзержинск, Нижегородская обл.,  
Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты численного анализа влияния сжимаемости снаряжения ударника диаметром 126 мм на параметры его нагружения под действием осевой перегрузки, испытываемой ударником при проникании в бетонную преграду с начальной скоростью 1000 м/с. Численное моделирование выполнено в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред, снаряжение представлено как сжимаемая упруго-пластическая среда. Рассмотрено три модельных варианта снаряжения с одной и той же плотностью в нормальных условиях, но с существенно различающимися характеристиками сжимаемости, описываемой с привлечением баротропной зависимости в форме Тэта. В число определяемых параметров состояния входили действующие в различных частях снаряжения осевые напряжения, скорость тыльной поверхности снаряжения и ее осевое смещение. Установлено, что изменение данных параметров в процессе торможения ударника в бетонной преграде носит характер затухающих колебаний, амплитудно-временные показатели которых в существенной степени зависят от характеристик сжимаемости снаряжения

### Ключевые слова

Проникание, бетонная преграда, перегрузка, снаряжение ударника, динамическая сжимаемость, численное моделирование

Поступила в редакцию 12.01.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

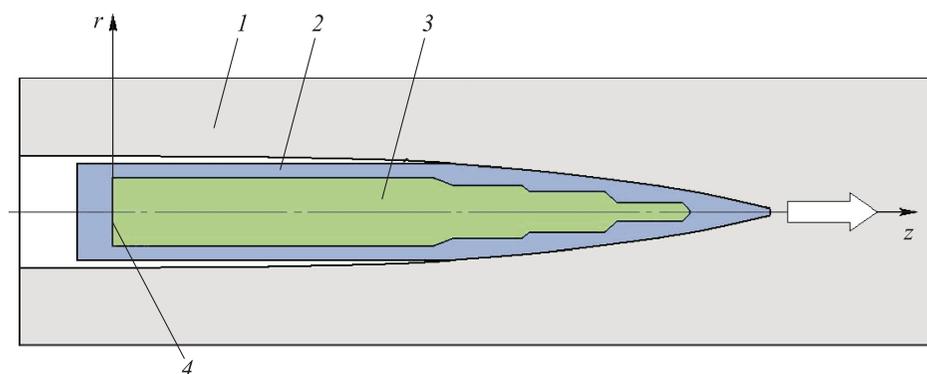
---

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке  
РФФИ (грант № 15-08-08319-а)*

Важной задачей является определение параметров состояния снаряжения ударников при их проникании в скальные и бетонные преграды. Под действием на снаряжение нагрузок, возникающих вследствие движения ударников с чрезвычайно большими отрицательными ускорениями, может произойти нарушение сплошности заполнения снаряжением зарядной камеры ударника, повреждение снаряжения, инициирование в нем недопустимых химических превращений,

что может повлечь нештатное функционирование ударника [1]. Актуальность вопросов, связанных с прогнозированием поведения снаряжения ударников при проникании в скальные и бетонные преграды, особенно возрастает при увеличении начальных скоростей взаимодействия.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред поведения снаряжения ударника диаметром 126 мм и полной массой около 54 кг под действием осевой перегрузки, возникающей при его проникании в бетонную преграду со скоростью 1000 м/с. Задачу решали в следующей постановке (рис. 1). Снаряжение занимало область, форма которой соответствовала форме зарядной камеры удар-



**Рис. 1.** Схема проникновения в бетонную преграду ударника со снаряжением:

1 — бетонная преграда; 2 — ударник; 3 — зарядная камера со снаряжением; 4 — тильная поверхность снаряжения

ника. Границы этой области считались абсолютно жесткими (недеформируемыми). Они полагались также неподвижными, так как задачу удобно решать в неинерциальной системе отсчета, связанной с ударником (система отсчета движется в осевом направлении с отрицательным ускорением, испытываемым ударником при проникании). При этом закон изменения ускорения ударника в зависимости от времени брался из решения независимой задачи о его проникании в бетонную преграду, в предположении, что ударник при проникании ведет себя, как абсолютно твердое недеформируемое тело, а взаимодействие происходит без угла атаки по нормали к свободной поверхности преграды [2, 3]. При расчете динамики проникания ударника предполагалось также, что он не оснащен импульсным реактивным двигателем, срабатывающим в процессе движения в преграде (для увеличения глубины проникания) [4, 5], так что ускорение ударника определялось только силой сопротивления бетонной преграды. Неинерциальность используемой системы отсчета учитывали путем введения в уравнение осевого движения частиц снаряжения сил инерции с объемной плотностью  $\rho n g$  ( $\rho$  — плотность снаряжения;  $n$  — осевая перегрузка, испытываемая ударником при проникании, определяемая модулем отношения его ускорения к ускорению свободного падения  $g$ ):

$$\rho \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho ng,$$

где  $t$  — время;  $v_z$  — осевая скорость частиц снаряджения;  $\sigma_z$ ,  $\tau_{rz}$  — нормальная осевая и касательная компоненты тензора напряжений;  $r$ ,  $z$  — радиальная и осевая координаты (см. рис. 1). При этом уравнение радиального движения частиц снаряджения имело традиционный вид [6]

$$\rho \frac{dv_r}{dt} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z},$$

где  $v_r$  — радиальная скорость частиц снаряджения;  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  — нормальные радиальная и окружная компоненты тензора напряжений.

Граничные условия были следующими (см. рис. 1). На всех поверхностях, ограничивающих объем снаряджения, за исключением его тыльной поверхности (соответствующей донной части камеры), задавались граничные условия «прилипания» (у находящихся на этих границах частиц снаряджения во все моменты времени полагались отсутствующими радиальная и осевая компоненты вектора скорости). Частицы на тыльной поверхности снаряджения имели возможность свободного движения в осевом и радиальном направлениях в том случае, если они выходили из контакта с донной частью камеры. При реализации данной ситуации нормальные и касательные напряжения на тыльной поверхности снаряджения считались нулевыми. В том случае, когда тыльная поверхность снаряджения находилась в контакте с донной частью камеры, принадлежащим ей частицам снаряджения допускалось иметь только осевую составляющую скорости в направлении от дна камеры.

Снаряджение рассматривалось в рамках модели сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности Мизеса [6].

Для численного моделирования использовалась разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана компьютерная программа ЭРУДИТ (Эвристический Расчет Упорядоченного Движения Индивидуальных Точек), реализующая вычислительный алгоритм, основанный на методе свободных лагранжевых точек [7] и достаточно подробно описанный в [8, 9]. В основе численного метода лежит введение в расчетной области неподвижной эйлеровой сетки, в ячейках которой размещаются индивидуальные (лагранжевы) точки среды, несущие информацию о всех ее параметрах движения и состояния и используемые для разностной аппроксимации соотношений механики сплошных сред. Наличие эйлеровой сетки позволяет для каждой индивидуальной точки легко устанавливать ближайшие к ней соседние точки, что необходимо при проведении разностной аппроксимации. В процессе движения среды координаты индивидуальных точек изменяются, поэтому на каждом временном шаге проводится процедура их перераспределения по ячейкам эйлеровой сетки. При проведении расчетов задавалась эйлерова сетка с одинаковыми размерами ячеек в радиальном и осевом направлениях. Для сквозного расчета ударных волн в расчетную схему вводилась искусственная вязкость [6]. При расчете пластического течения упругопластической среды использовался упрощенный подход

[10], в соответствии с которым первоначально определяли действующие в среде компоненты девиатора тензора напряжений в предположении упругого поведения материала с последующей их корректировкой на основании условия пластичности (так называемая процедура приведения вектора девиатора напряжений на круг текучести). Описанный алгоритм был опробован на численном решении широкого круга задач взрывного и ударного нагружений сплошных сред и хорошо себя зарекомендовал [11–13]. К числу его достоинств следует отнести возможность расчета движений сплошной среды с большими деформациями без использования специальных процедур перестройки расчетной сетки.

При проведении расчетов основное внимание было уделено исследованиям влияния характеристик сжимаемости снаряжения на параметры его состояния под действием перегрузки, испытываемой ударником при проникании. Уравнение сжимаемости снаряжения, используемое в расчетной методике, бралось в виде баротропной зависимости в форме Тэта [14]

$$p = A \left\{ \left( \rho / \rho_0 \right)^k - 1 \right\}, \quad (1)$$

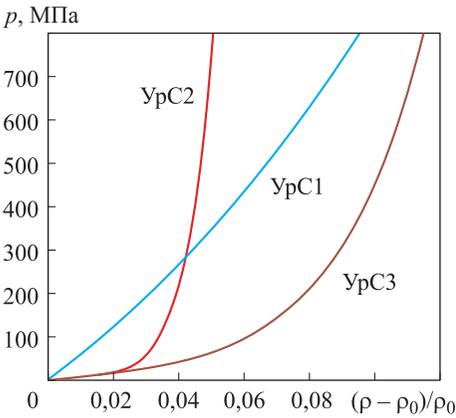
где  $p$  — давление в снаряжении;  $A$  и  $k$  — эмпирические параметры;  $\rho$  и  $\rho_0$  — плотность снаряжения при давлении  $p$  и нормальных условиях (при нулевом давлении). Было рассмотрено три варианта данного уравнения сжимаемости, отличающихся значениями параметров  $A$  и  $k$  и обозначаемых в дальнейшем как УрС1, УрС2 и УрС3. Значения  $A$  и  $k$  в используемых модельных уравнениях сжимаемости были определены на основании данных, приведенных в [14–16]. При этом в тех случаях, когда по справочным данным динамическая сжимаемость материала снаряжения задавалась в соответствии с ударной адиабатой  $D = c_0 + \lambda u$ , связывающей скорость ударной волны  $D$  с массовой скоростью вещества  $u$  ( $c_0, \lambda$  — эмпирические параметры, первый из которых близок к скорости звука в материале в нормальных условиях), входящие в уравнение сжимаемости в форме Тэта (1) параметры  $A$  и  $k$  определялись в соответствии с зависимостями [17]

$$A = \frac{\rho_0 c_0^2}{4\lambda - 1}; \quad k = 4\lambda - 1.$$

В таблице для всех используемых модельных вариантов уравнения сжимаемости снаряжения (1) приведены значения параметров  $A$  и  $k$ , а также значения скорости звука  $c_0$  в нормальных условиях (при нулевом давлении), определяемой как  $c_0 = \sqrt{dp/d\rho} = \sqrt{kA/\rho_0}$  (плотность наполнителя в нормальных условиях во всех случаях полагалась одной и той же и составляла  $\rho_0 = 1900 \text{ кг/м}^3$ ).

#### Параметры различных модельных вариантов уравнения сжимаемости снаряжения

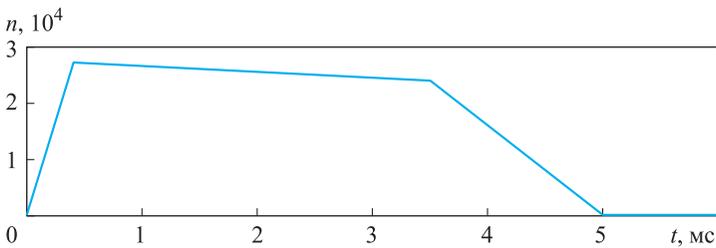
Обозначение уравнения	$A$ , МПа	$k$	$c_0$ , м/с
УрС1	611	9,2	1720
УрС2	1,1	134	279
УрС3	10,3	40	466



**Рис. 2.** Сравнительный анализ различных модельных вариантов баротропных зависимостей в форме Тэта, используемых для описания сжимаемости снаряжения

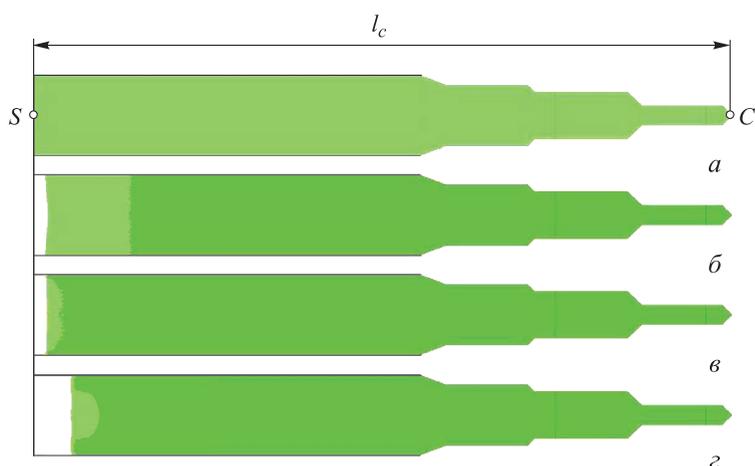
Что касается  $U\rho C2$ , то оно задает более высокую по сравнению с  $U\rho C1$  сжимаемость наполнителя в области давлений ниже 300 МПа и более низкую при давлениях, превышающих данное значение.

Задаваемый при численном моделировании поведения снаряжения закон изменения с течением времени перегрузки  $n$ , испытываемой ударником, приведен на рис. 3. Он представляет собой кусочно-линейную аппроксимацию кривой изменения перегрузки, полученную из расчета проникания ударника в полубесконечную бетонную преграду [18–20] с начальной скоростью 1000 м/с (результатирующая глубина проникания ударника составляла около 2,5 м). Для каждого из трех модельных вариантов снаряжения с различными характеристиками сжимаемости рассматривали два значения предела текучести 1 и 5 МПа.



**Рис. 3.** Закон изменения перегрузки, испытываемой ударником при проникании в бетонную преграду, с течением времени

На рис. 4 приведены поля плотностей снаряжения с пределом текучести 5 МПа и разными характеристиками сжимаемости (согласно  $U\rho C1$ ,  $U\rho C2$  и  $U\rho C3$ ) в момент времени, когда осадка тыльной поверхности снаряжения близка к максимальной (осевой размер зарядной камеры составляет  $l_c = 750$  мм). Видно, что

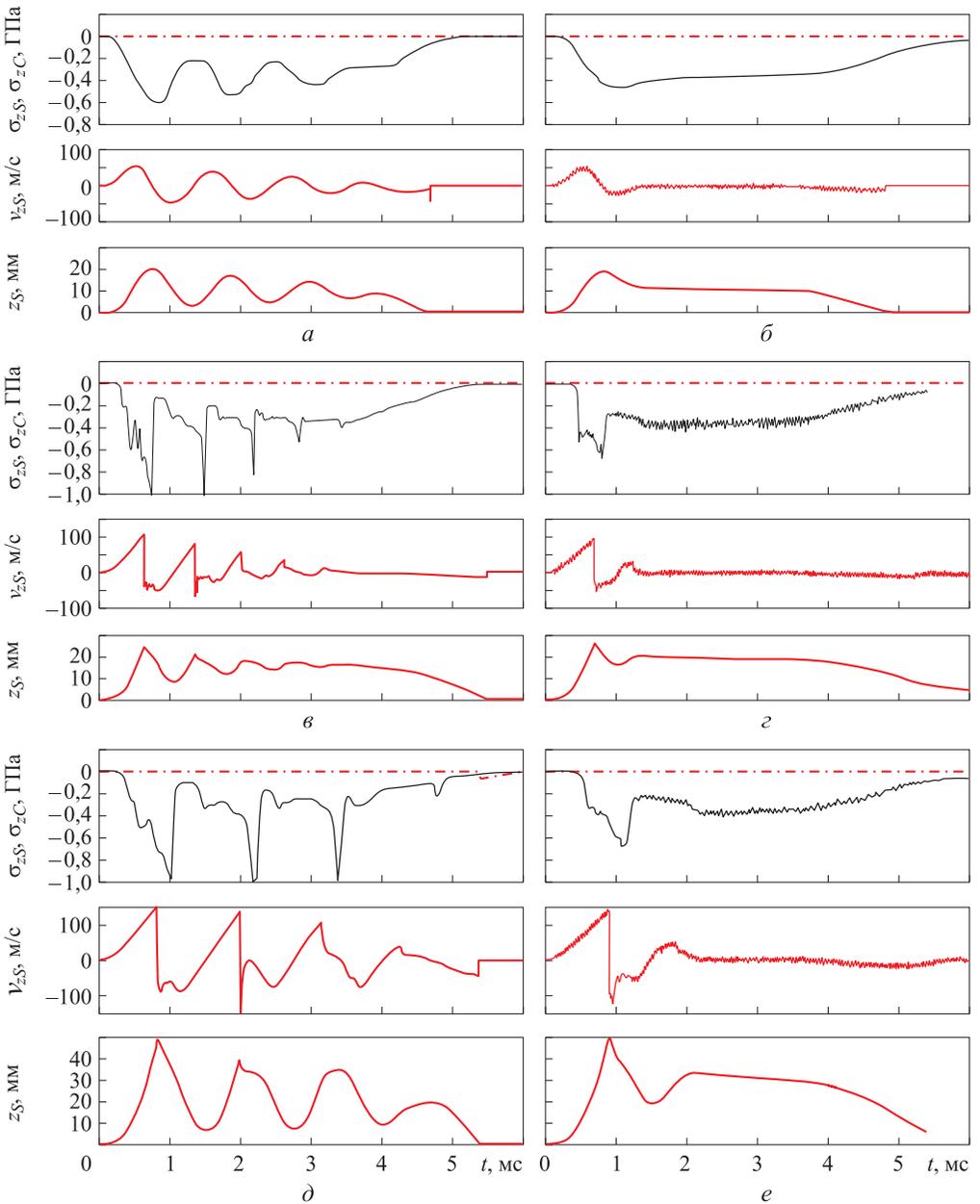


**Рис. 4.** Исходное состояние снаряжения с пределом текучести 5 МПа (*а*) и его осадка под действием осевой перегрузки, испытываемой ударником в процессе проникания, при использовании в расчетах модельных уравнений сжимаемости снаряжения УрС1 (*б*), УрС2 (*в*) и УрС3 (*г*)

при использовании УрС1 и УрС2 максимальная осадка тыльной поверхности снаряжения в результате действия осевой перегрузки остается примерно одинаковой, а при использовании УрС3 она возрастает более чем в 2 раза.

На рис. 5 для рассматриваемых уравнений сжимаемости снаряжения и пределов текучести приведены временные зависимости различных параметров в расчетных точках  $S$  и  $C$ , положение которых указано на рис. 4, *а*. Расчетные точки располагались на оси симметрии — точка  $S$  на тыльной поверхности снаряжения, а точка  $C$  на передней (носовой) границе зарядной камеры. В число определяемых в данных точках параметров входили действующие в снаряжении осевые напряжения  $\sigma_{zS}$  и  $\sigma_{zC}$ , скорость тыльной поверхности  $v_S$  и ее осевое смещение  $z_S$ .

Из рис. 5 следует, что при малой прочности снаряжения (предел текучести 1 МПа) для всех вариантов уравнения сжимаемости изменение параметров в расчетных точках имеет колебательный характер (рис. 5, *а, в, д*). Однако при использовании УрС2 и УрС3 колебания параметров происходят с их резкими выплесками, появление которых связано с существенным изменением сжимаемости наполнителя с ростом давления, происходящим согласно УрС2 и УрС3 (если зависимость УрС1 на рис. 2 во всем диапазоне близка к прямой линии, то зависимости УрС2 и УрС3 имеют значительную кривизну, особенно УрС2). Наклон УрС2 и УрС3 к горизонтальной оси с ростом давления резко возрастает, что соответствует резкому увеличению скорости звука в наполнителе. При этом на низкочастотные колебания наполнителя, связанные с пробегами волн в осевом направлении, начинают накладываться имеющие существенно более высокую частоту радиальные колебания, что и дает резкие выплески параметров.



**Рис. 5.** Изменение под действием осевой перегрузки, испытываемой ударником при проникании, осевых напряжений  $\sigma_{zC}$  (сплошные линии) и  $\sigma_{zS}$  (штрихпунктирные линии) в расчетных точках, скорости  $v_S$  и смещения  $z_S$  тыльной поверхности снаряда при различных уравнениях сжимаемости и разных пределах текучести:

*a* — УрС1, 1 МПа; *б* — УрС1, 5 МПа; *в* — УрС2, 1 МПа; *г* — УрС2, 5 МПа; *д* — УрС3, 1 МПа; *е* — УрС3, 5 МПа

Увеличение предела текучести наполнителя до 5 МПа приводит к быстрому демпфированию его колебаний — после одного-двух колебаний на начальной стадии действия перегрузки изменение параметров принимает монотонный ха-

раक्टर (рис. 5, б, з, е). Если говорить о максимальных значениях параметров нагружения наполнителя с различными уравнениями сжимаемости осевой перегрузкой в результате торможения ударника в бетонной преграде, то они оказываются следующими. При переходе от УрС1 к УрС2 и УрС3 максимальные сжимающие напряжения, действующие в «носике» зарядной камеры (точка С, см. рис. 4, а), возрастают от 500...600 МПа до 700...1000 МПа. Максимальные скорости тыльной поверхности снаряжения (точка S, см. рис. 4, а) относительно корпуса ударника повышаются примерно от 50 м/с до 100...150 м/с. Максимальные смещения тыльной поверхности снаряжения составляют ~20 мм при использовании УрС1, 25 мм при использовании УрС2 и достигают 50 мм для снаряжения с уравнением сжимаемости УрС3.

Следует отметить, что если не принимать во внимание свойства сжимаемости и прочности снаряжения (использовать для него модель несжимаемой жидкости), то осевое напряжение  $\sigma_{zC}$  в носике зарядной камеры (см. рис. 4, а) будет определяться гидростатическим соотношением  $\sigma_{zC} = -\rho_0 n g l_c$  и изменяться с течением времени по тому же закону, что и перегрузка  $n$  ударника (см. рис. 3). При этом максимальное сжимающее напряжение в носике камеры (достигаемое в момент времени около 0,4 мс, соответствующий максимуму действующей перегрузки  $2,7 \cdot 10^4$ ) составляло бы 385 МПа, что существенно (в 1,5...3 раза) меньше значений, полученных в численных расчетах с использованием разных модельных уравнений сжимаемости снаряжения (см. рис. 5). Таким образом, свойство сжимаемости снаряжения сильно влияет на параметры его состояния при действии осевой перегрузки в процессе проникания ударника и должно обязательно учитываться. Влияние сжимаемости проявляется в большей степени при малой прочности снаряжения (см. рис. 5, а, в, д). С увеличением до 5 МПа предела текучести снаряжения закон изменения напряжения  $\sigma_{zC}$  в носике зарядной камеры после «всплесков» на начальной стадии фактически воспроизводит закон изменения действующей перегрузки (см. рис. 5, б, з, е).

Когда перегрузка в результате полной остановки ударника в преграде прекращает действовать и «просевшая» тыльная поверхность снаряжения «возвращается» обратно, при ее соударении с донной частью зарядной камеры могут возникать импульсы сжимающих напряжений на контактной поверхности. Этот эффект можно проследить по изменению осевого напряжения  $\sigma_{zS}$  в точке S (см. рис. 4, а) на оси тыльной поверхности снаряжения. На приведенной на рис. 5, д кривой изменения  $\sigma_{zS}$  видно, что для снаряжения с уравнением сжимаемости УрС3 и малым значением предела текучести (1 МПа) напряжение  $\sigma_{zS}$  после окончания действия перегрузки скачкообразно изменяется от нулевого значения (которое оно имело в течение всего предшествующего промежутка времени, когда между тыльной поверхностью снаряжения и дном зарядной камеры существовал зазор  $z_s$ ) до ~100 МПа в отрицательной области. Реализация данного эффекта может привести к значительному силовому воздействию на элементы конструкции ударника, размещенные в донной части его зарядной

камеры, что должно приниматься во внимание. При увеличении до 5 МПа прочностных свойств снаряжения и для снаряжения с уравнениями сжимаемости УрС1 и УрС2 проявлений последствий обратного удара снаряжения по дну зарядной камеры после окончания действия осевой перегрузки практически не наблюдается (см. рис. 5, а, б, в, г, е).

**Выводы.** Таким образом, один из основных выводов, который можно сделать по результатам проведенных расчетов, заключается в весьма существенном влиянии характеристик сжимаемости снаряжения на параметры его нагружения при торможении ударника в бетонной преграде. Поэтому расчетному определению параметров состояния снаряжения в процессе проникания ударников в скальные и бетонные преграды должно предшествовать скрупулезное опытное установление кривой его динамической сжимаемости. Приведенные параметры состояния снаряжения (механические напряжения, скорости и смещения относительно стенок зарядной камеры тыльной поверхности заряда), полученные с использованием различных модельных вариантов уравнения сжимаемости снаряжения, должны восприниматься как границы диапазонов возможного изменения указанных параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов В.В., ред. Средства поражения и боеприпасы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
2. 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. P. 76–94. DOI: 10.1177/1056789514521647 URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1056789514521647>
3. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 7. С. 94–104.
4. 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. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-40-56
5. Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды // Известия РАН. 2014. № 4. С. 53–63.
6. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред. В 3 т. Т. 3. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
7. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.
8. Федоров С.В. О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2008. № S2. С. 73–80.

9. 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. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83
10. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
11. Федоров С.В., Баянова Я.М., Ладов С.В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 150–164.
12. Федоров С.В., Велданов В.А. К определению размеров кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 2. С. 15–20.
13. Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах // Известия РАН. 2012. № 1. С. 43–50.
14. Жерноклетов М.В., ред. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. 428 с.
15. Новиков С.А., ред. Взрывчатые вещества. Т. 1. Поведение твердых взрывчатых веществ при механических нагрузках. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. 415 с.
16. Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. В 2 т. Т. 1. М.: Физматлит, 2004. 832 с.
17. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 9. С. 45–51.
18. 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. No. 5. P. 479–497. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00108-2  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X02001082>
19. Экспериментальные и теоретические исследования влияния механических свойств бетона и бетонных конструкций на характер их деформирования при проникании скоростного ударника / В.А. Велданов, А.Ю. Даурских, Д.Е. Дудик, А.Л. Исаев, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 7-3. С. 26–28.
20. Teland J.A., Sjol H. Penetration into concrete by truncated projectiles // International Journal of Impact Engineering. 2004. Vol. 30. No. 4. P. 447–464. DOI: 10.1016/S0734-743X(03)00073-3  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X03000733>

**Федоров Сергей Владимирович** — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Велданов Владислав Антонович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Перфильев Андрей Юрьевич** — начальник отдела АО «ГосНИИмаш им. В.В. Бахирева» (Российская Федерация, 606002, Нижегородская обл., г. Дзержинск, проспект Свердлова, д. 11а).

**Смирнов Александр Сергеевич** — д-р техн. наук, начальник отдела АО «ГосНИИмаш им. В.В. Бахирева» (Российская Федерация, 606002, Нижегородская обл., г. Дзержинск, проспект Свердлова, д. 11а).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Федоров С.В., Велданов В.А., Перфильев А.Ю., Смирнов А.С. Влияние сжимаемости снаряда на параметры его состояния при проникании ударника в бетонную преграду // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 5. С. 28–40.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-28-40

**EFFECT OF FILLING COMPRESSIBILITY ON THE VARIABLES OF STATE DURING PROJECTILE PENETRATION INTO A CONCRETE TARGET**

**S.V. Fedorov<sup>1</sup>**

sergfed-64@mail.ru

**V.A. Veldanov<sup>1</sup>**

vevladi@mail.ru

**A.Yu. Perfil'ev<sup>2</sup>**

andprf@yandex.ru

**A.S. Smirnov<sup>2</sup>**

smirnoffas@mail.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC Bakhirev Institute of Mechanical Engineering, Dzerzhinsk, Nizhegorodskaya obl., Russian Federation

**Abstract**

The article presents the results of a numerical analysis investigating how the compressibility of a 126 mm diameter projectile affects its loading parameters in response to the g-force the projectile is subjected to as it penetrates a concrete target at an initial velocity of 1000 m/s. We performed our numerical simulation in the framework of a two-dimensional axisymmetric continuum mechanics problem, representing the filling as a compressible elastoplastic medium. We investigated three alternative filling models that have the same density under normal conditions but considerably different compressibility properties, which we describe using a barotropic Tait equation. The state variables we determined included longitudinal stresses in various regions of the filling, its rear surface velocity and axial displacement. We found that as the projectile decelerates in the concrete target, the fluctuations in these parameters are of the nature of damped oscillations, the amplitude-by-time characteristics of which depend substantially on the filling compressibility

**Keywords**

*Penetration, concrete target, g-force, projectile filling, dynamic compressibility, numerical simulation*

**REFERENCES**

[1] Selivanov V.V., ed. Sredstva porazheniya i boeprisy [Weapons and ammunition]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 984 p.

- [2] 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. DOI: 10.1177/1056789514521647  
Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1056789514521647>
- [3] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 992–1002.  
DOI: 10.1134/S1063784211070231  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784211070231>
- [4] Fedorov S.V., Fedorova N.A. Influence of the soil and rocky target strength properties on projectiles penetration depth with additional action of the jet thrust impulse. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 4, pp. 40–56 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-40-56
- [5] Fedorov S.V., Fedorova N.A., Veldanov V.A. Using jet propulsion burn to increase research module penetration distance into low-strength ground obstacles. *Izvestiya RARAN*, 2014, no. 4, pp. 53–63 (in Russ.).
- [6] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred: V 3 t. T. 3. Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekeyushchikh protsessov*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 520 p.
- [7] Oran E.S., Boris J.P. *Numerical simulation of reactive flow*. Elsevier, 1987. 601 p.
- [8] Fedorov S.V. On cut-off possibility of high-speed metal jet precursor region in process of shaped charge explosion in axial magnetic field. *Boepripsy i vysokoenergeticheskie kondensirovannyye sistemy*, 2008, no. S2, pp. 73–80 (in Russ.).
- [9] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. Influence numerical analysis of velocity and strength of high density alloy elongated projectiles on their penetration depth into the steel target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 1, pp. 65–83 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83
- [10] Wilkins M.L. Calculation of elastic-plastic flow. In: *Fundamental methods in hydrodynamics*. Vol. 3. New York, London, Academic Press, 1964. 386 p.
- [11] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. Numerical analysis of the effect of the geometric parameters of a combined shaped-charge liner on the mass and velocity of explosively formed compact elements. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 130–142. DOI: 10.1134/S0010508215010141  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0010508215010141>
- [12] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Determination of the dimension of a cavity in water behind a fast-moving cylindrical body. *Technical Physics*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 165–169.  
DOI: 10.1134/S1063784213020072  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784213020072>
- [13] Fedorov S.V., Veldanov V.A. Application of segmented strikers for cavern forming in ground-rock obstacles. *Izvestiya RARAN*, 2012, no. 1, pp. 43–50 (in Russ.).
- [14] Zhernokletov M.V., ed. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh* [Methods of material properties research under intense dynamic loads]. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2005. 428 p.

[15] Novikov S.A., red. Vzryvchatye veshchestva. T. 1. Povedenie tverdykh vzryvchatykh veshchestv pri mekhanicheskikh nagruzkakh [Explosives. Vol. 1. Solid explosives behavior under mechanical loads]. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2001. 415 p.

[16] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva. V 2 t. T. 1 [Explosion physics. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 832 p.

[17] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, no. 9, pp. 1266–1271. DOI: 10.1134/S1063784211090088

Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784211090088>

[18] 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, no. 5, pp. 479–497. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00108-2

Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X02001082>

[19] Veldanov V.A., Dauriskikh A.Yu., Dudik D.E., Isaev A.L., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. Experimental and theoretical research of concrete and concrete construction mechanical properties impact on their deformation character under penetration of speed-up striker. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 7–3, pp. 26–28 (in Russ.).

[20] Teland J.A., Sjol H. Penetration into concrete by truncated projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, vol. 30, no. 4, pp. 447–464.

DOI: 10.1016/S0734-743X(03)00073-3

Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X03000733>

**Fedorov S.V.** — Assist. Professor, High Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Veldanov V.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, High Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Perfil'ev A.Yu.** — Head of Department, JSC Bakhirev Institute of Mechanical Engineering (Sverdlova prosp. 11a, Dzerzhinsk, Nizhegorodskaya obl., 606002 Russian Federation).

**Smirnov A.S.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department, JSC Bakhirev Institute of Mechanical Engineering (Sverdlova prosp. 11a, Dzerzhinsk, Nizhegorodskaya obl., 606002 Russian Federation).

#### Please cite this article in English as:

Fedorov S.V., Veldanov V.A., Perfil'ev A.Yu., Smirnov A.S. Effect of Filling Compressibility on the Variables of State During Projectile Penetration Into a Concrete Target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 5, pp. 28–40. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-28-40