

Установление режимов взаимодействия стержней со смещающимися преградами по результатам численного моделирования

© И.Ф. Кобылкин, Д.А. Еськов

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

На основании анализа кинематики и динамики взаимодействия высокоскоростных стержней с движущимися в одном направлении с ним плитами с учетом известных экспериментальных данных выявлены следующие режимы взаимодействия: 1) отсутствие взаимодействия, 2) взаимодействие по типу «скольжение», 3) взаимодействие со слабым разрушением стержня и 4) взаимодействие с сильным разрушением стержня. С использованием модели проникания стержней в преграды Алексеевского — Тейта получены аналитические критерии реализации этих режимов. Для проверки данных критериев в программном комплексе ANSYS Autodyn выполнено трехмерное численное моделирование процесса взаимодействия стержней из высокоплотных материалов со смещающимися стальными плитами, подтвердившее, в основном, аналитические критерии.

Ключевые слова: проникание стержней в прочные преграды, динамическая защита, высокоскоростное взаимодействие, численное моделирование.

Интерес к изучению процесса взаимодействия высокоскоростных стержней большого удлинения со смещающимися пластинами и плитами обусловлен прежде всего тем, что большинство современных танков оснащено динамической защитой (ДЗ), основанной на существенном увеличении защищающей способности элементов броневых преград — пластин и плит при их смещении под углом к направлению воздействия противотанковых средств поражения с необходимой скоростью [1]. Во встроенной динамической защите воздействие на высокоскоростные стержневые ударники осуществляется движущимися массивными плитами, одна из которых смещается навстречу, а другая — в одном направлении с ударником [1].

Воздействие лицевой плиты, смещающейся навстречу направлению воздействия, в основном сводится к приданию стержню угла атаки, так как стержень при любых углах встречи легко перерезает плиту. Иначе обстоит дело с процессом взаимодействия тыльной плиты с ударником.

Как показывает анализ кинематики и динамики взаимодействия высокоскоростных стержней с движущимися в том же направлении плитами с учетом известных экспериментальных данных, возможны следующие режимы взаимодействия: 1) отсутствие взаимодействия;

2) взаимодействие по типу «скольжение» или «рикошет»; 3) взаимодействие со слабым разрушением стержня; 4) взаимодействие с сильным разрушением стержня. Последние два варианта схематично представлены на рис. 1.

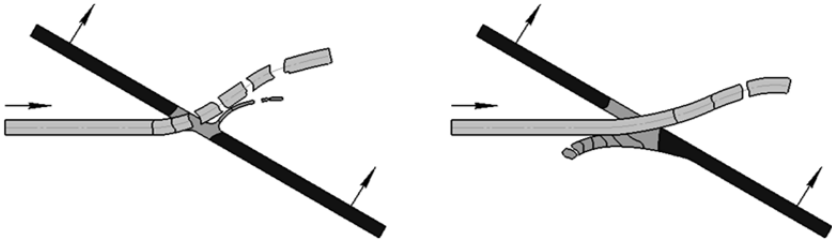


Рис. 1. Варианты взаимодействия ударника с плитой «вдогон»

Рассмотрим кинематику взаимодействия стержня с плитой «вдогон». Скорость плиты V_t можно разложить на составляющие — вдоль траектории ударника $V_t/\sin \alpha$ и вдоль плиты $V_t/\operatorname{tg} \alpha$ (рис. 2).

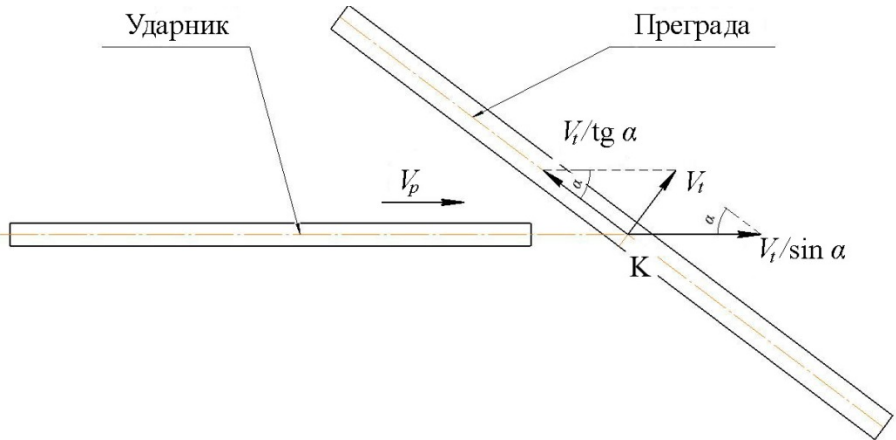


Рис. 2. Схема взаимодействия «вдогон»

При переходе в систему координат с неподвижной точкой K (рис. 3) — точкой первоначального контакта стержня с плитой, их взаимодействие можно свести к слиянию двух потоков, движущихся со скоростями V_r (соответствует ударнику) и $V_t/\operatorname{tg} \alpha$ (соответствует плите):

$$V_r = V_p - V_t/\sin \alpha. \quad (1)$$

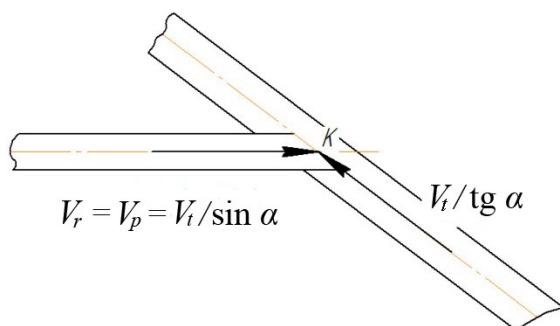


Рис. 3. Скорости в системе координат с неподвижной точкой K

Условие контакта ударника с плитой $V_r \geq 0$, или

$$V_p \geq V_t / \sin \alpha. \quad (2)$$

При несоблюдении условия (2) реализуется режим взаимодействия 1 — отсутствие контакта.

Критерий рикошета удлинённого ударника от сдвигающейся преграды (режим 2) получен И.Ф. Кобылкиным [1]. В соответствии с этим критерием удлинённый тяжёлосплавный ударник, имеющий скорость 1600 м/с, рикошетирует от неподвижной стальной преграды при угле взаимодействия 77° (угол взаимодействия измеряется между линией воздействия и нормалью к преграде). При поперечной составляющей скорости преграды $V_\tau = 300$ м/с, перпендикулярной ударнику, угол рикошета уменьшается до 69° , а при $V_\tau = 500$ м/с — до $63,5^\circ$. Такое уменьшение угла рикошета является практически значимым и отчасти объясняет повышенную стойкость подвижных бронепреград, по которым осуществляется воздействие «вдогон». И наоборот, при взаимодействии с преградой, движущейся навстречу ударнику, критический угол возрастает до 82° при скорости преграды $V_\tau = 300$ м/с, до 84° — при $V_\tau = 500$ м/с.

Для разделения режимов 2, 3 и 4 необходимо рассмотреть физические особенности взаимодействия ударника с плитой. Для определения критической скорости V_c , по достижении которой ударник начинает проникать в преграду, воспользуемся моделью Алексеевского — Тейта. В соответствии с этой моделью

$$V_c = \sqrt{(2R_t - Y_p) / \rho_p}, \quad (3)$$

где R_t — сопротивление преграды прониканию, Па; Y_p — динамический предел текучести ударника, Па; ρ_p — плотность материала ударника, $\text{кг}/\text{см}^3$.

Согласно [3], R_t имеет значения порядка $(4...7)\sigma_b$, где σ_b — предел прочности материала преграды, что для высокопрочной броневой стали дает $(5,6...9,8)$ ГПа.

Согласно [2], ударник не должен проникать в плиту для реализации наиболее эффективного режима взаимодействия: если ударник проникает в плиту, то он разрушается слабо (см. рис. 1). Для предотвращения проникания ударника в преграду необходимо выполнение неравенства $V_r < V_c$. Преобразуя это выражение с учетом выражений (1) и (3) для V_r и V_c и добавляя условие контакта, получим следующее ограничение на отношение скоростей ударника и преграды:

$$\sin \alpha \geq V_t / V_p \geq (1 - V_c / V_p) \sin \alpha. \quad (4)$$

Для проверки критериального соотношения (4) проведен ряд численных экспериментов в программном комплексе ANSYS Autodyn.

Решалась трехмерная задача взаимодействия уранового ударника с плитой из высокопрочной стали, движущейся в том же направлении, что и ударник, и расположенной под углом к ударнику. Моделировалось взаимодействие стержня с плитой толщиной 20 мм, вектор скорости которой направлен под углом к вектору скорости ударника так, как показано на рис. 1. Скорость плиты V_t в различных опытах составляла соответственно 330 м/с, 450 м/с, 660 м/с. В качестве материала плиты была выбрана высокопрочная сталь с уравнением состояния в форме Грюнайзена, в качестве условия пластичности взято условие Мизеса с пределом прочности $\sigma_b = 1,4$ ГПа. Динамическое деформирование материала плиты описывалось моделью Джонсона – Кука [4].

Поскольку высокоскоростное взаимодействие стержневых ударников сопряжено с значительными деформациями расчетных ячеек, применялась процедура эрозии. Эрозия — нефизичный процесс удаления счетных ячеек при их чрезмерном растягивании. Она позволяет избежать уменьшения шага по времени, «закручивания» и вырождения ячеек. При удалении все параметры (энергия, импульс и т. д.) передаются граничащим с ними ячейкам. Для плиты показатель эрозии по геометрическому растяжению превосходил 110 %.

Диаметр стержня составлял 24 мм, удлинение (отношение длины стержня к его диаметру) — 28, скорость $V_p = 1650$ м/с. В качестве материала стержня выбран обедненный уран с уравнением состояния в форме Грюнайзена, критерий прочности взят в форме Стейнберга [5]. Разрушение материала ударника начиналось по достижении критических пластических деформаций (50 %). Показатель эрозии по геометрическому растяжению также превосходил 110 %. Для взаи-

модействующих материалов значения параметров взаимодействия составляют: $Y_p = 2,0$ ГПа, $R_t = 10,1$ ГПа, $V_c = 930$ м/с.

По результатам моделирования построена диаграмма режимов взаимодействия (рис. 4). По этой диаграмме легко проследить линии, соответствующие границам режимов 1 и 4, которые, в свою очередь, соответствуют условиям (1) и (3). Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Отношение скоростей V_t/V_p	Угол взаимодействия									
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
0,2	◇	●	○	—	○	—	—	—	—	—
0,3	—	—	◇	●	●	○	○	—	—	—
0,4	—	—	◇	—	◇	●	●	●	—	○

Обозначения: ◇ — «скольжение» стержня по плите; ● — сильное разрушение, ○ — слабое разрушение.

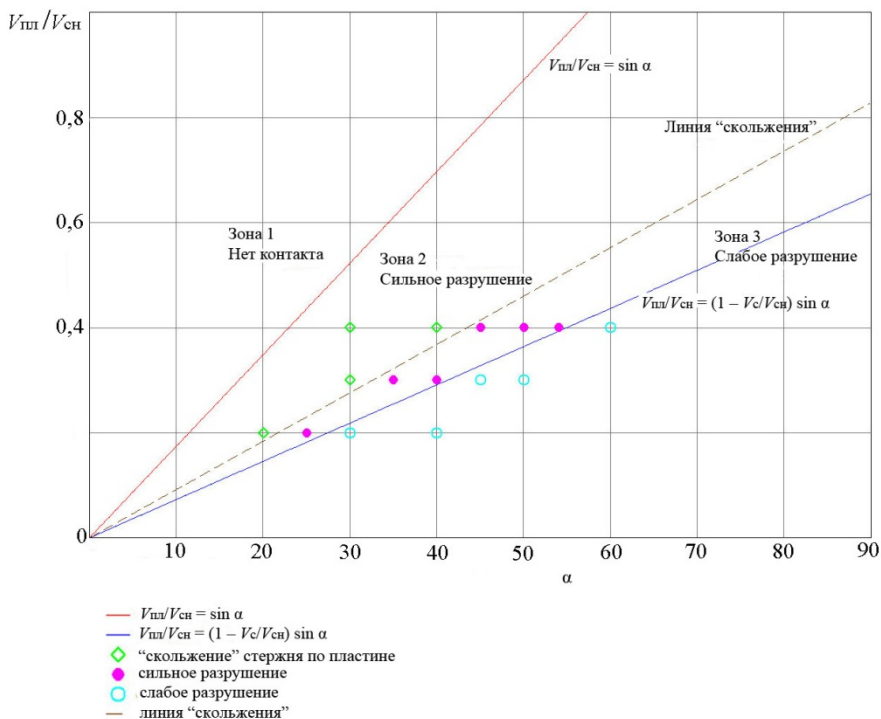


Рис. 4. Диаграмма взаимодействия

На рис. 5 представлены характерные режимы взаимодействия ударника с плитой: скольжение (рис. 5, *а*), сильное разрушение (рис. 5, *б*), слабое разрушение (рис. 5, *в*).

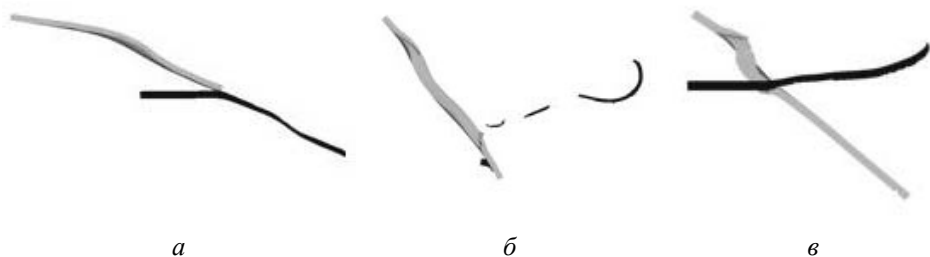


Рис. 5. Различные режимы взаимодействия плиты с ударником:
а — рикошет; *б* — сильное разрушение; *в* — слабое разрушение

Во всех случаях выполняется критерий (1), так как левее его взаимодействия просто не происходит.

При малой скорости плиты и при относительно малых углах (от 20° при $V_t/V_p = 0,2$ до 40° при $V_t/V_p = 0,4$) наблюдается процесс «скольжения» стержня по плите (см. рис. 5, *а*), представляющий собой предельный случай рикошета ударника от плиты. При 30° и $V_t/V_p = 0,4$ рикошет виден явно. При таком режиме взаимодействия контакт с плитой происходит не по всей длине ударника, особенно если длина ударника сопоставима с длиной плиты.

При больших углах реализуется режим с максимальным разрушением стержня (см. рис. 5, *б*), удовлетворяющий условию (3). Так, при $V_t/V_p = 0,2$ сильное разрушение наблюдается при угле взаимодействия 25° , при $V_t/V_p = 0,3$ — при углах 35° и 40° , при $V_t/V_p = 0,4$ — углы $45^\circ \dots 55^\circ$. Необходимо отметить, что в этом режиме отмечается практически постоянный контакт головной части ударника с плитой, ударник в плиту не проникает, а наверх летит стружка, оставшаяся после срабатывания ударника с плитой.

При дальнейшем увеличении угла взаимодействия перестает выполняться условие (3), ударник начинает перерезать плиту, и, соответственно, разрушаться в меньшей степени (см. рис. 5, *в*). Такие результаты получены при $V_t/V_p = 0,2$ и углах 30° и 40° ; при $V_t/V_p = 0,3$ и углах 45° и 50° ; при $V_t/V_p = 0,4$ и угле 60° .

Результаты численного моделирования, в основном, подтверждают аналитические критерии, с помощью которых можно определить скорости смещения плит, обеспечивающие максимальное разрушение стержней.

Приведенная теория, подтвержденная результатами численного моделирования, позволяет в широком диапазоне регулировать параметры взаимодействия ударников со стержнями, выбирать оптимальный режим взаимодействия, которым является режим сильного разрушения. При известной скорости подхода стержня для различных углов наклона плит можно получить оптимальные скорости метания плит, при которых воздействие плиты наиболее эффективно. Переходя к реальным задачам, с помощью данной теории для различных конструктивных схем установки динамической защиты можно определить необходимую скорость метания плиты, при которой ее воздействие на подлетающий с определенной скоростью высокоскоростной стержневой ударник будет оптимальным.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Григорян В.А., Дорохов Н.С., Кобылкин И.Ф. и др. *Частные вопросы конечной баллистики*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 592 с.
- [2] Rozenberg Z., Dekel E. On the role of material properties in the terminal ballistics of long rods. *Int. Journal of Impact Engineering*, 30(2004), pp. 835–851.
- [3] Rosenberg Z., Ashuach Y., Yeshurun Y., Dekel E. On the main mechanisms for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets. *Int. Journal of Impact Engineering*, 36 (2009), pp. 588–596.
- [4] Johnson G.R., Cook W.H. Fracture Characteristics of Three Metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *J. Eng Mech.*, 1985, vol. 21, pp. 31–48.
- [5] Steinberg D.J. *Equation of State and Strength Properties of Selected Materials*. Report UCRL-MA-106439, LLNL, Feb. 1991.

Статья поступила в редакцию 20.04.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кобылкин И.Ф., Еськов Д.А. Установление режимов взаимодействия стержней со смещающимися преградами по результатам численного моделирования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1390.html>

Кобылкин Иван Федорович окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 200 научных и научно-методических трудов, в том числе 11 монографий и учебников в области теории взрывчатых веществ, взрывных технологий, химической физики горения и взрыва, материалов и структур легкой бронезащиты, динамической защиты бронетехники. e-mail: kobylkin_ivan@mail.ru

Еськов Денис Александрович родился в 1991 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2014 г. Аспирант кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области численного моделирования процессов физики взрыва и удара. e-mail: vosskuez@gmail.com

Mode establishment of interaction between long rods and moving plates by the results of numerical simulations

©I.F. Kobylikin, D.A. Eskov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Based on the analysis of the kinematics and dynamics of the interaction between long rods and moving in the same direction plates and considering the known experimental data the authors revealed the following interaction modes: 1) the absence of interaction, 2) "slip" type interaction, 3) interaction with weak destruction of the rod and 4) interaction with strong destruction of the rod. Using the Alexeesky – Tate model of penetration of the rods into targets, analytical criteria for these modes was formed. To test these criteria, the authors used ANSYS Autodyn software for 3D numerical simulation of the interaction between the rods of high-density materials and moving steel plates, that, mainly, confirmed analytical criteria.

Keywords: *penetration into firm targets, reactive armor, high-speed interaction, numerical simulations.*

REFERENCES

- [1] Grigoryan V.A., Dorokhov N.S., Kobylikin I.F., et al. *Chastnye voprosy konechnoy ballistiki* [Particular issues of ultimate ballistics]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 592 p.
- [2] Rozenberg Z., Dekel E. On the role of material properties in the terminal ballistics of long rods. *Int. Journal of Impact Engineering*, 30(2004), pp. 835–851.
- [3] Rosenberg Z., Ashuach Y., Yeshurun Y., Dekel E. On the main mechanisms for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets. *Int. Journal of Impact Engineering*, 36 (2009), pp. 588–596.
- [4] Johnson G.R., Cook W.H. Fracture Characteristics of Three Metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *J. Eng Mech.*, 1985, vol. 21, pp. 31–48.
- [5] Steinberg D.J. Equation of State and Strength Properties of Selected Materials. *Report UCRL-MA-106439*, LLNL, Feb. 1991.

Kobylikin I.F. (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department of High-Precision Airborne Devices at the Bauman Moscow State Technical University. The author of about 200 scientific works and methodical works, including 11 monographs and textbooks on the theory explosive, blasting technology, chemical physics of combustion and explosion, materials and structures of light armor, armor armored vehicles. e-mail: kobylikin_ivan@mail.ru

Eskov D.A. (b. 1991) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2014. He is a graduate student at the Department of High-Precision Airborne Devices at BMSTU. Author of 5 publications in the field of numerical simulation of the processes in physics of explosion and collision. e-mail: vosskuez@gmail.com.