

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-1-86-95

МЕХАНИЧЕСКИЙ ИЗНОС КОРПУСА ПЕНЕТРАТОРА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ДВИЖЕНИЯ В ГРУНТЕ

© 2023 г.

**Борисов И.А.¹, Герасимов С.И.^{1,2},
Рыжов И.В.¹, Капинос С.А.¹, Кузьмин В.А.¹**

¹*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

²*Саровский физико-технический институт – филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Саров, Российская Федерация*

s.i.gerasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 05.01.2023

Одним из важнейших параметров при выборе конструкции пенетратора служат обводы кавитатора – его головной части – и характер уноса материала. В ходе проведенных испытаний пенетрирующих элементов при внедрении в грунтовые преграды обнаружен эффект абразивного изнашивания материала на кавитирующей поверхности, вызванный царапающим воздействием частичек грунта. Масштаб абразивного изнашивания сильно зависит от формы головной части. Например, проникающий элемент с кавитатором с плоским торцом демонстрирует незначительный износ боковых кромок, а конический кавитатор заметно изменяет свою геометрическую форму. Для оценки величины износа пенетрирующих элементов с коническим кавитатором использовалась модель абразивного изнашивания Дж. Арчарда. Основная сложность применения этой модели сводится к экспериментальному определению значения коэффициента в зависимости величины износа от скорости. В экспериментах внутри пенетраторов располагались бортовые измерительные комплексы, регистрирующие зависимости ускорения от времени на террадинамическом участке траектории. После опытов пенетраторы извлекались из вала и измерялась их остаточная длина. Для оценки влияния износа на террадинамические характеристики пенетраторов проведена серия расчетов параметров процесса их внедрения в грунтовую преграду для плоской, оживальной и конической форм наконечника. Согласно полученным результатам, учет процесса изнашивания кавитирующего наконечника приводит к снижению глубины и к более интенсивному торможению пенетратора, что является результатом снижения массы пенетратора в процессе внедрения и увеличения диаметра кавитирующего конуса. Как и следовало ожидать, этот эффект заметно проявляется при большой начальной скорости внедрения.

Ключевые слова: пенетратор, кавитатор, модель абразивного изнашивания Арчарда, террадинамические характеристики, константа износа.

Для изучения строения приповерхностных слоев Земли, Луны, Марса и других космических тел в России и за рубежом предполагается использование высокоскоростных зондирующих устройств – пенетраторов. Определение закономерностей процессов проникания твердых тел в грунтовые среды актуально, но затруднено по ряду объективных причин [1–10]. Для расчета большое значение имеют экспериментальные зависимости, которые используются для тестирования или верификации применяемых подходов и моделей для описания процессов проникания [11–20].

Проведены экспериментальные исследования процесса абразивного износа кавитатора пенетратора в процессе движения в грунтовой преграде. Определялся уровень износа конического и оживального кавитаторов, а также кавитатора с плоским торцом.

В опытах пенетраторы выстреливались из пушек калибром 100 и 152 мм и внедрялись в песчаный вал с естественной влажностью. При этом регистрировалась скорость и угол подхода пенетратора к валу и параметры его движения на террадинамическом участке. После опыта пенетраторы извлекались из вала и путем обмера определялся уровень механического износа. На рис. 1 представлена фотография пенетратора на аэробаллистическом участке траектории.

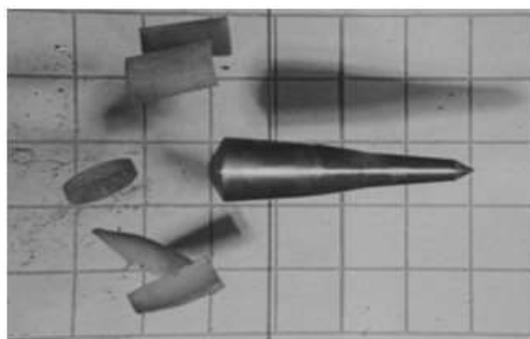


Рис. 1. Пенетратор на аэробаллистическом участке траектории

Фотография пенетратора в преграде, на которой отчетливо видны следы как абразивного, так и эрозионного износа, представлена на рис. 2. Но поскольку эрозионный износ в меньшей степени влияет на террадинамические характеристики (ТДХ) пенетратора, цель экспериментальных исследований заключалась в определении влияния абразивного износа на параметры проникания пенетратора.



Рис. 2. Фотография пенетратора после проникания в преграду

Фотографии кавитаторов пенетраторов различной формы до и после опытов представлены на рис. 3.

По результатам испытаний установлено:

- пенетратор с кавитатором с плоским торцом имеет износ на боковой кромке торца кавитатора, изменения длины пенетратора не происходит (рис. 3а);
- пенетратор с оживальным кавитатором демонстрирует незначительный износ, изменение длины пенетратора составило не более 2 мм (рис. 3б);
- пенетратор с коническим кавитатором демонстрирует значительное изменение длины за счет износа (рис. 3в).

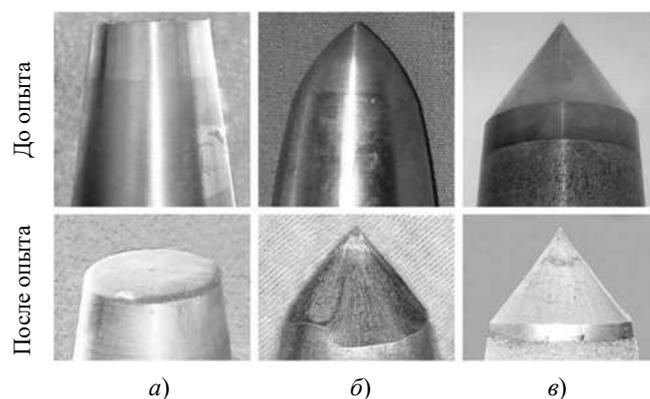


Рис. 3. Форма кавитаторов до и после опыта

Характер износа оживального и конического кавитаторов – абразивный. На боковой поверхности кавитаторов наблюдаются характерные царапины и канавки, оставленные частицами песка.

У кавитатора с плоским торцом износ практически отсутствует. Это объясняется тем, что в процессе внедрения пенетратора формируется присоединенный грунтовый конус, угол раствора которого определяется углом внутреннего трения в грунте. Фактически перед плоским торцом кавитатора образуется застойная зона грунта конической формы, которая вместе с пенетратором движется в преграде. Соответственно частицы набегающего потока грунта скользят не по кавитатору пенетратора, а по некой поверхности присоединенного грунтового конуса. При такой картине обтекания изнашиванию подвергается лишь боковая кромка плоского торца, через которую проходят «образующие» грунтового конуса.

Наиболее интенсивный износ наблюдается для конического кавитатора. Фотографии кавитатора до и после опыта представлены на рис. 4.

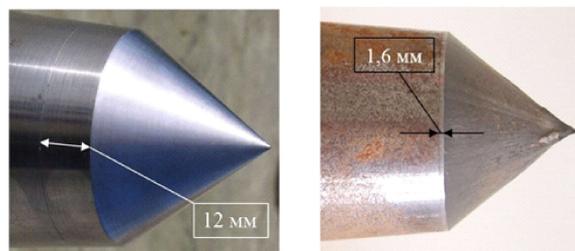


Рис. 4. Фотографии конического кавитатора до и после опыта

Для расчетных оценок величины износа конического кавитатора использована модель абразивного изнашивания Арчарда [21], согласно которой интенсивность абразивного изнашивания i (объем изношенного материала, приходящийся на единицу пути трения) прямо пропорциональна нормальной нагрузке и обратно пропорциональна твердости изнашиваемого материала:

$$i = \frac{I}{L} = K \frac{F}{H}, \quad (1)$$

где I – величина износа (объем изношенного материала), L – длина пути трения, F – нормальная нагрузка (сила сопротивления), H – твердость изнашиваемого материала. Коэффициент износа K является безразмерной величиной и определяется экспериментально.

В первом приближении за нагрузку на кавитирующую поверхность можно принять действие скоростного напора грунта при постоянном коэффициенте сопротивления [22]. Тогда соотношение (1) запишется в виде:

$$i = \frac{I}{L} = \frac{K}{H} \frac{C_X \rho V^2}{2} S, \quad (2)$$

где C_X – коэффициент лобового сопротивления, ρ – плотность грунтовой преграды, V – скорость движения пенетратора, S – площадь основания кавитирующего конуса пенетратора.

В выражении (2) за величину износа I принят объем изношенного материала. Однако приняв, что кавитирующий конус по всей поверхности изнашивается равномерно, удобнее перейти к тому, чтобы износ измерялся в единицах длины и фактически соответствовал укорочению пенетратора. Тогда безразмерную интенсивность изнашивания i можно представить в виде:

$$i = \frac{K}{H} \frac{C_X \rho V^2}{2}. \quad (3)$$

Поскольку интенсивность изнашивания является отношением износа к пути, на котором происходило изнашивание, то общую величину износа можно определить так:

$$I = \int_0^{X_k} i dx, \quad (4)$$

или

$$I = \frac{K}{H} \frac{C_X \rho}{2} \int_0^{X_k} V^2 dx, \quad (5)$$

где x и X_k – глубина и конечная глубина внедрения пенетратора.

Выражения (4), (5) определяют величину износа через интенсивность изнашивания. Для того, чтобы эту же величину выразить через время внедрения, сделаем замену переменной интегрирования:

$$dx = V dt, \quad (6)$$

где t – время внедрения пенетратора. Тогда

$$I = \frac{K}{H} \frac{C_X \rho}{2} \int_0^{t_k} V^3 dt, \quad (7)$$

где t_k – момент времени прекращения движения.

Соотношения (5) и (7) могут быть напрямую использованы для расчета величины износа при конкретном случае соударения. Однако следует понимать, что достоверное определение констант, стоящих перед интегральным выражением, достаточно затруднено. Коэффициент K может существенно зависеть, например, от влажности грунта в преграде, поскольку находящаяся в грунте вода фактически выступает в качестве смазки, наличие которой может изменить коэффициент K на порядки [1, с. 93]. Также может оказывать влияние и наличие глинистых частиц, щебеночных и гравийных включений и т.п. Сложности возникают и при определении величины H . Дело в том, что в используемой модели Арчарда строгая обратно пропорциональная зависимость между интенсивностью изнашивания и твердостью изнашиваемого материала лишь качественно отображает физику процесса. При количественных оценках величину H необходимо рассматривать как некий функционал, зависящий от твердости. Трудности с определением величин, стоящих в выражениях (5) и (7), делают нахождение величины износа только с помощью расчета слабо достоверным. Более рациональным представляется совмещенный расчетно-экспериментальный метод определения, при котором по результатам опытов определяется величина, стоящая в выражениях (5) и (7) перед интегралом, которую можно обозначить коэффициентом A :

$$A = \frac{K}{H} \frac{C_X \rho}{2}. \quad (8)$$

Тогда выражения (5) и (7) запишутся в виде:

$$I = A \int_0^{x_k} V^2 dx, \quad (9)$$

$$I = A \int_0^{t_k} V^3 dt. \quad (10)$$

Эмпирическое значение коэффициента A определялось по результатам опытов с пенетраторами, имеющими разные обводы, калибром 100 мм и 152 мм, с кавитирующим наконечником из стали ЭП637 (Н18К9М5Т), которые разгонялись в стволе пороховой баллистической установки, после чего внедрялись в насыпной грунтовый вал до остановки. Во всех опытах определялась зависимость скорости модели пенетратора от времени $V(t)$ в процессе движения в грунтовой преграде, а после опытов модели пенетратора извлекались из вала и измерялась величина конечного износа кавитирующего наконечника. По результатам опытов вычислялся коэффициент:

$$A = \frac{I}{\int_0^{t_k} V^3 dt}. \quad (11)$$

Поскольку коэффициент A в каждом из опытов может принимать различные значения в зависимости от фактической плотности и влажности грунта, коэффициента износа и других параметров, определено, что величина A распределена по нормальному закону, и полученная выборка, состоящая из 12 опытов, не содержит промахов и грубых погрешностей. Затем по полученной эмпирической выборке рассчитан интервал, в котором с доверительной вероятностью $P = 0,8$ находится значение:

$$A = (7 \pm 4) \cdot 10^{-9} \text{ (с/м)}^2. \quad (12)$$

Как установлено, в зависимости от фактических значений плотности и влажности грунта, коэффициента износа и других факторов значение A с доверительной вероятностью 80% будет находиться в интервале от $3 \cdot 10^{-9}$ до $11 \cdot 10^{-9}$ (с/м)². Столь широкий диапазон возможных значений коэффициента A делает малоэффективным расчетный способ определения величины износа с помощью соотношения (10), поскольку в зависимости от принятого в расчете значения коэффициента A расчетное значение износа I может отличаться в несколько раз. Однако, приняв величину коэффициента износа за среднее значение интервала, можно сделать качественную оценку влияния износа кавитатора на ТДХ пенетратора.

Оценить изменение ТДХ пенетратора с учетом износа именно в процессе его движения представляется возможным с использованием инженерно-аналитической методики, предназначенной для расчета параметров движения тел различной формы в грунтовой преграде. Заложенные в этой методике алгоритмы учитывают изменение геометрии и массы пенетратора под воздействием абразивного износа на каждом шаге интегрирования [23]. Для этого проведены расчеты внедрения пенетратора калибром 100 мм в грунтовую преграду на скоростях 380, 600 и 760 м/с с учетом и без учета износа. На рис. 5 представлены зависимости глубины его внедрения от времени (*а*) и зависимости скорости внедрения от глубины (*б*). Обозначения для кривых на рис. 5*а* и *б* одинаковые.

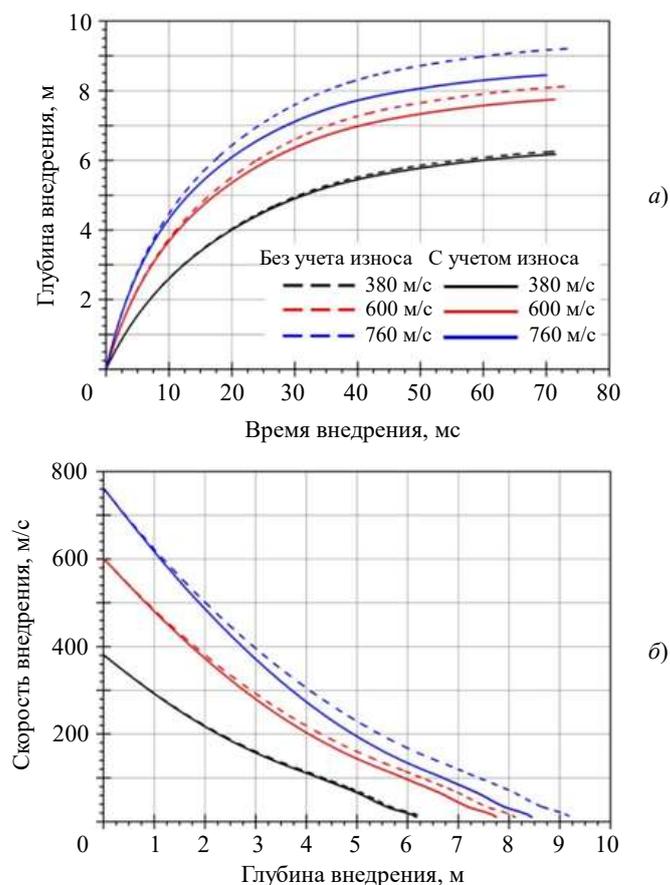


Рис. 5. Результаты расчетов параметров проникания с учетом и без учета износа

На рисунке наглядно показано, что при увеличении скорости внедрения пенетратора с коническим кавитатором в грунтовую преграду влияние абразивного износа становится более выраженным. Также на начальном этапе внедрения или при скоростях меньше 400 м/с влияние износа на проникание не достигает каких-либо существенных значений.

Заключение

Показано, как кавитаторы плоской, оживальной и конической формы подвержены абразивному износу при внедрении в грунтовые преграды, представлен расчетно-эмпирический метод прогнозирования величины износа и эмпирически определен коэффициент износа. По полученным данным с помощью инженерно-аналитической методики проведена качественная оценка влияния абразивного износа кавитатора пенетратора на его ТДХ.

В связи с этим при проектировании пенетратора можно сделать следующие выводы:

- 1) при использовании кавитаторов с плоским торцом абразивный износ практически не наблюдается, а оживальный кавитатор имеет незначительный износ, которым можно пренебречь;
- 2) при использовании конического кавитатора абразивный износ принимает значения, которые влияют на ТДХ пенетратора, поэтому его необходимо учитывать;
- 3) пренебречь абразивным износом при использовании конического кавитатора можно в том случае, если скорость внедрения пенетратора не превышает 400 м/с.

Список литературы

1. Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок. В кн.: *Механика: Сб. переводов. №6*. М.: ИЛ, 1957. С. 125–137.
2. Bless S., Cooper W., Watanabe K. Penetration of rigid roads into sand. *3th International Symposium of Ballistics*. Maimi, FL. USA. 12–16 Sept. 2011. P. 1252–1257.
3. Borg J.P., Morrissey M.P., Perich C.A., Vogler T.J., Chhabildas L.C. In situ velocity and stress characterization of a projectile penetrating a sand target: Experimental measurements and continuum simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2013. Vol. 51. P. 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.07.009>.
4. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D., Setchell R.E. Gas-gun experiments determine forces on penetrators into geological targets. *Journal of Applied Mechanics*. 1984. Vol. 51. Iss. 3. P. 602–607. <https://doi.org/10.1115/1.3167680>.
5. Feldgun V.R., Yankelevsky D.Z., Karinski Y.S. A new simplified analytical model for soil penetration analysis of rigid projectiles using the Riemann problem solution. *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 101. P. 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.10.015>.
6. Hauver G.E. Penetration with instrumented rods. *International Journal of Engineering Science*. 1978. Vol. 16. Iss. 11. P. 871–877. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90072-1](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90072-1).
7. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. и др. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии. *Журнал технической физики*. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 94–104.
8. Баландин В.В., Брагов А.М., Игумнов Л.А., Котов В.Л., Ломунов А.К., Константинов А.Ю. Динамическое деформирование мягких грунтовых сред: экспериментальные исследования и математическое моделирование. *Изв. РАН. МТТ*. 2015. №3. С. 69–77.
9. Бивин Ю.К. Проникание твердых тел в сыпучие и слоистые среды. *Изв. РАН. МТТ*. 2008. №1. С. 154–160.
10. Велданов В.А., Федоров С.В. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании. *Прикладная механика и техническая физика*. 2005. Т. 46. №6. С. 116–127.

11. Брагов А.М., Баландин В.В., Котов В.Л., Баландин Вл.Вл., Линник Е.Ю. Экспериментальное исследование удара и проникания конического ударника в мерзлый песчаный грунт. *Прикладная механика и техническая физика*. 2018. Т. 59. №3. С. 111–120. DOI: 10.15372/PMTF20180312.
12. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Травов Ю.Ф. и др. Экспериментальное определение коэффициента сопротивления конических проникающих тел и проникающего с плоским передним торцом при сверхзвуковом движении в песчаном грунте. *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. Вып. 3. С. 542–548. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.03.50535.233-20>.
13. Бивин Ю.К., Викторов В.В., Коваленко Б.Я. Определение динамических характеристик грунтов методом пенетрации. *Изв. АН СССР. МТТ*. 1980. №3. С. 105–110.
14. Баженов В.Г., Котов В.Л., Крылов С.В., Баландин В.В., Брагов А.М., Цветкова Е.В. Экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой. *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42. №6. С. 190–198.
15. Forrestal M.J., Grady D.E. Penetration experiments for normal impact into geological targets. *International Journal of Solids and Structures*. 1982. Vol. 18. Iss. 3. P. 229–234. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(82\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0020-7683(82)90005-1).
16. Goldsmith W., Wu W.-Z. Response of rocks to impact loading by bars with pointed ends. *Rock Mechanics*. 1981. Vol. 13. Iss. 3. P. 157–184.
17. Maynard D.K. Projectile impact and penetration dynamics – correlation of analytical and experimental results. *Proceedings of International Conference on Fractal Mechanics and Technology*. 1977. Vol. 2. P. 1329–1342.
18. Герасимов С.И., Травов Ю.Ф., Иоилев А.Г. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование высокоскоростного проникания длинных стержневых ударников в песок. *Журнал технической физики*. 2022. Т. 92. Вып. 3. С. 392–404. DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52134.275-21.
19. Герасимов С.И., Зубанков А.В., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Трепалов Н.А., Калмыков А.П., Капинос С.А., Сироткина А.Г. Экспериментальное исследование движения ударника в песчаной среде бесконтактным способом. *Прикладная механика и техническая физика*. 2021. Т. 62. №1. С. 159–164. DOI: 10.15372/PMTF20210117.
20. Bless S., Peden B., Guzman I., Omidvar M., Iskander M. Poncelet coefficients of granular media. *Dynamic Behavior of Materials*. 2014. Vol. 1. P. 373–380. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00771-7_45.
21. Крагельский И.В. *Трение и износ*. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
22. Балаганский И.А., Мерзиевский Л.А. *Действие средств поражения и боеприпасов*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 408 с.
23. Киселев Ю.Г. Физические основы методики расчета движения осесимметричных конических тел в плотных сжимаемых средах в режиме гидродинамического срабатывания. *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. матер. III науч. конф.* Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. Т. 2. С. 522–530.

References

1. Allen W.A., Mayfield E.B., Morrison H.L. Dynamics of a projectile penetrating sand. Part II. *Journal of Applied Physics*. 1957. Vol. 28. Iss. 11. P. 1331–1335. DOI: 10.1063/1.1722645.
2. Bless S., Cooper W., Watanabe K. Penetration of Rigid Rods into Sand. *3th Int. Symp. of Ballistics*. Maimi, FL. USA. 12–16 Sept. 2011. P. 1252–1257.
3. Borg J.P., Morrissey M.P., Perich C.A., Vogler T.J., Chhabildas L.C. In situ velocity and stress characterization of a projectile penetrating a sand target: Experimental measurements and continuum simulations. *Int. J. Impact Eng.* 2013. Vol. 51. P. 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.07.009>.
4. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D., Setchell R.E. Gas-gun experiments determine forces on penetrators into geological targets. *J. Appl. Mech.* 1984. Vol. 51. Iss. 3. P. 602–607. <https://doi.org/10.1115/1.3167680>.
5. Feldgun V.R., Yankelevsky D.Z., Karinski Y.S. A new simplified analytical model for soil

- penetration analysis of rigid projectiles using the Riemann problem solution. *Int. J. Impact Eng.* 2017. Vol. 101. P. 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.10.015>.
6. Hauver G.E. Penetration with instrumented rods. *Int. J. Eng. Sci.* 1978. Vol. 16. Iss. 11. P. 871–877. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90072-1](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90072-1).
7. Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I. et al. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data. *Technical Physics*. 2011. Vol. 56. Iss. 7. P. 992–1002. <https://doi.org/10.1134/S1063784211070231>.
8. Balandin V.V., Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Y., Kotov V.L., Lomunov A.K. Dynamic deformation of soft soil media: experimental studies and mathematical modeling. *Mechanics of Solids*. 2015. Vol. 50. No 3. P. 286–293. DOI: 10.3103/S002565441503005X.
9. Bivin Yu.K. Penetration of rigid bodies into loose and layered media. *Mechanics of Solids*. 2008. Vol. 43. Iss. 1. P. 131–136. DOI: 10.1007/s11964-008-1013-z.
10. Veldanov V.A., Fedorov S.V. Soil behavior at the interface with a rigid projectile during penetration. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2005. Vol. 46. No 6. P. 867–875. DOI: 10.1007/s10808-005-0146-x.
11. Bragov A.M., Balandin V.V., Kotov V.L., Linnik E.Y. Experimental study of the impact and penetration of a cone in frozen sand. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2018. Vol. 59. No 3. P. 482–490. DOI: 10.1134/S0021894418030124.
12. Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Travov Yu.F. et al. Experimental determination of the drag coefficient of conical penetrators and a penetrator with a flat front end during supersonic motion in sandy soil. *Technical Physics*. 2021. Vol. 66. Iss. 3. P. 528–534. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784221030087>.
13. Bivin Yu.K., Viktorov V.V., Kovalenko B.Ya. Opređenje dinamičeskikh kharakteristik gruntov metodom penetratsii [Determination of dynamic characteristics of soils by penetration method]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]* 1980. No 3. P. 105–110 (In Russian).
14. Bazhenov V.G., Kotov V.L., Krylov S.V., Balandin V.V., Bragov A.M., Tsvetkova E.V. Experimental-theoretical analysis of nonstationary interaction of deformable impactors with soil. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2001. Vol. 42. No 6. P. 1083–1089.
15. Forrestal M.J., Grady D.E. Penetration experiments for normal impact into geological targets. *Int. J. Solids Struct.* 1982. Vol. 18. Iss. 3. P. 229–234. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(82\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0020-7683(82)90005-1).
16. Goldsmith W., Wu W.-Z. Response of rocks to impact loading by bars with pointed ends. *Rock Mechanics*. 1981. Vol. 13. Iss. 3. P. 157–184.
17. Maynard D.K. Projectile impact and penetration dynamics – correlation of analytical and experimental results. *Proc. Int. Conf. Fract. Mech. and Technol.* 1977. Vol. 2. P. 1329–1342.
18. Gerasimov S.I., Travov Yu.F., Ioilev A.G. et al. Eksperimentalnoe i teoreticheskoe issledovanie vysokoskorostnogo pronikaniya dlinnykh sterzhnevnykh udarnikov v pesok [Experimental and theoretical study of high-velocity penetration of long rod projectiles into sand]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*. 2022. Vol. 92. Iss. 3. P. 392–404 (In Russian).
19. Gerasimov S.I., Zubankov A.V., Trepalov N.A., Kalmykov A.P., Kapinos S.A., Sirotkina A.G., Kikeev V.A., Erofeev V.I. Experimental study of impactor motion in a sandy medium by a contactless method. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2021. Vol. 62. Iss. 1. P. 139–144. DOI: 10.1134/S002189442101017X.
20. Bless S., Peden B., Guzman I., Omidvar M., Iskander M. Poncelet coefficients of granular media. *Dynamic Behavior of Materials*. 2014. Vol. 1. P. 373–380. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00771-7_45.
21. Kragelskiy I.V. *Trenie i iznos [Friction and Wear]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1968. 480 p. (In Russian).
22. Balagansky I.A., Merzhievsky L.A. *Deystvie sredstv porazheniya i boeprispasov [Action of Means of Destruction and Combat Supplies]*. Novosibirsk. NGTU Publ. 2004. 408 p. (In Russian).
23. Kiselev Yu.G. Fizicheskie osnovy metodiki rascheta dvizheniya osesimmetrichnykh konicheskikh tel v plotnykh szhimaemykh sredakh v rezhime gidrodinamicheskogo sratatyvaniya [Physical bases of the methodology for calculating the motion of axisymmetric conical bodies in dense compressible media in the mode of hydrodynamic actuation]. *Sovremennye metody*

proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya: Sbornik materialov III nauchnoy konferentsii [Modern Methods of Designing and Testing Rocket and Artillery Weapons: Collection of Materials of the III Scientific Conference]. Sarov. RFNC–VNIIEF. 2003. Vol. 2. P. 522–530 (In Russian).

MECHANICAL WEAR OF THE PENETRATOR BODY DURING ITS MOVEMENT IN THE GROUND

**Borisov I.A.¹, Gerasimov S.I.^{1,2}, Ryzhov I.V.¹,
Kapinos S.A.¹, Kuzmin V.A.¹**

¹*Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

²*Sarov Physics and Technical Institute of NRNU “MEPHI”, Sarov, Russian Federation*

s.i.gerasimov@mail.ru

Received by the Editor 2023/01/05

One of the most important parameters when choosing the design of the reactor is the contours of the cavitator – its head part and the nature of the material entrainment. During the tests of penetrating elements when embedded in soil barriers, the effect of abrasive wear of the material on the cavitating surface caused by the scratching effect of soil particles was detected. Moreover, the scale of abrasive wear strongly depends on the shape of the head part, for example, a penetrating element with a cavitator with a flat end shows slight wear of the side edges, and a conical cavitator noticeably changes its geometric shape. To estimate the wear of penetrating elements with a conical cavitator, it is proposed to use the J. Archard abrasive wear model. The main difficulty in applying this model leads to the experimental determination of the value of the coefficient characterizing the dependence of the wear rate on the speed. Inside the penetrators, onboard measuring complexes were located that recorded the dependence of acceleration on time on the terradynamic section of the trajectory. After the experiments, the penetrators were removed from the shaft and their residual length was measured. To assess the effect of wear on the terradynamic characteristics of the penetrators, a series of calculations of the parameters of the process of their penetration into the soil barrier for a flat, ogive and conical shape of the tip was carried out. According to the results obtained, taking into account the wear process of the cavitating tip leads to a decrease in the depth and to a more intensive penetration of the penetrator, which is the result of a decrease in the mass of the penetrator during the insertion process and an increase in the diameter of the cavitating cone. As expected, the penetration parameters change most noticeably at a high initial penetration rate.

Keywords: penetrator, cavitator, Archard abrasive wear model, terradynamic characteristics, wear constant.