

## Экспериментальное определение коэффициента сопротивления конических проникающих тел и проникающего тела с плоским передним торцом при сверхзвуковом движении в песчаном грунте

© С.И. Герасимов,<sup>1,2,3,4</sup> В.И. Ерофеев,<sup>3,4</sup> Ю.Ф. Травов,<sup>1</sup> А.Г. Иоилев,<sup>1</sup> В.В. Писецкий,<sup>2</sup> С.А. Капинос,<sup>1</sup> А.П. Калмыков,<sup>1</sup> Н.В. Лапичев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup> Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ,

607186 Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>3</sup> Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института прикладной физики РАН,

603024 Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,

603950 Нижний Новгород, Россия

e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2020 г.

В окончательной редакции 14 сентября 2020 г.

Принято к публикации 1 октября 2020 г.

Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента сопротивления при проникании в песчаный грунт конических и цилиндрических ударников. В экспериментах угол полураствора конического наконечника проникающего тела (ударника) изменялся от 10 до 90 deg. Скорость движения ударника изменялась в интервале 0.2–2.0 km/s. Получены средние значения коэффициента сопротивления для конических тел при квазистационарном сверхзвуковом движении в песчаном грунте средней влажности 7–12%, а для ударников с плоским передним торцом — в песчаном грунте влажностью от 0 до 16%. Показана существенная зависимость коэффициента сопротивления тонких конусов ( $\beta < 25^\circ$ ) от скорости движения и отсутствие таковой (с учетом экспериментальной погрешности) для тупых конусов и ударника с плоским торцом.

**Ключевые слова:** высокоскоростное проникание, конический проникающий тел, проникающий тел с плоским передним торцом, песок, коэффициент сопротивления.

DOI: 10.21883/JTF.2021.03.50535.233-20

### Введение

Высокоскоростные проникающие устройства могут применяться для зондирования поверхностного слоя Земли, и в перспективе для других небесных тел с целью изучения их строения и разведки полезных ископаемых [1]. Нагрузки, испытываемые такими устройствами при проникании, не должны приводить к их значительным деформациям, что позволяет рассматривать динамику проникания в грунт как движение абсолютно жесткого тела в сопротивляющейся среде [2]. Определение закономерностей процессов проникания твердых тел в грунтовые среды затруднено как нестационарностью самих процессов, так и неоднородностью, нестабильностью свойств природных грунтов. В связи с этим большое значение имеют экспериментальные закономерности, которые применяются для тестирования или верификации применяемых для описания процессов проникания подходов и моделей.

Экспериментальному исследованию процесса проникания в мягкий грунт посвящены сотни публикаций, однако практически все они касаются дозвукового дви-

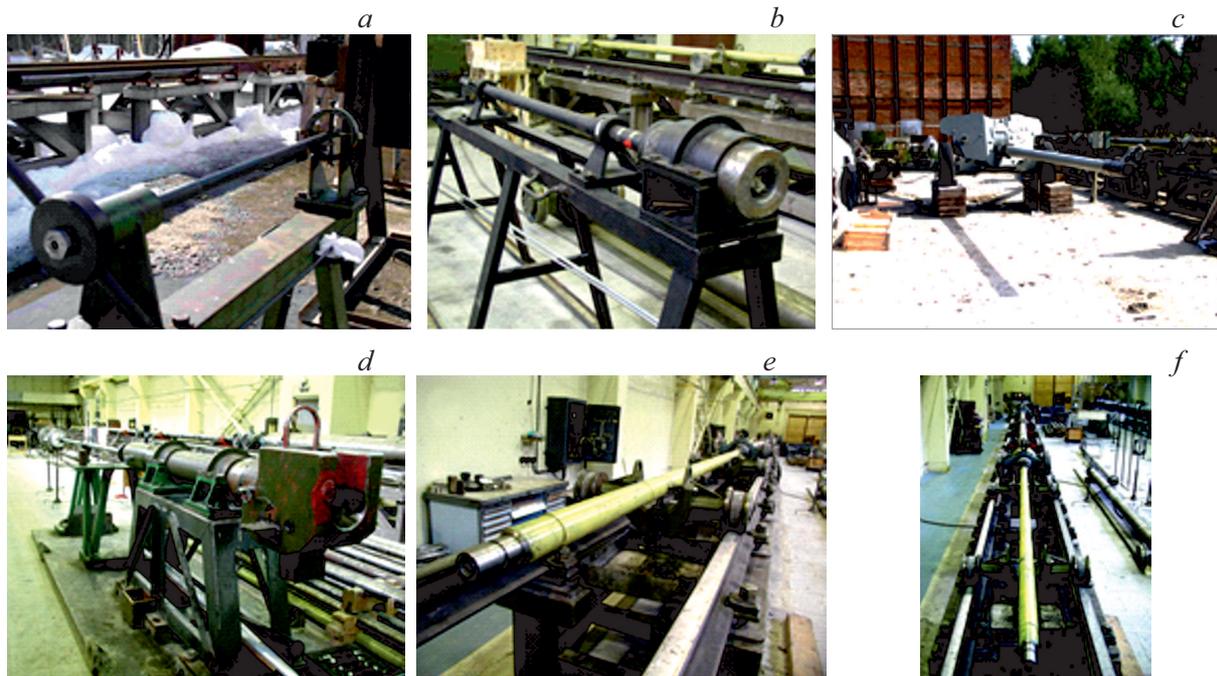
жения. Исследованию же сверхзвукового движения в мягком грунте цилиндрических ударников с коническим наконечником или с плоским передним торцом посвящены немногочисленные работы [3–5].

Нами проведено экспериментальное исследование высокоскоростного процесса проникания металлического ударника в песчаный грунт при скорости движения  $V$  в интервале 0.2–2.0 km/s.

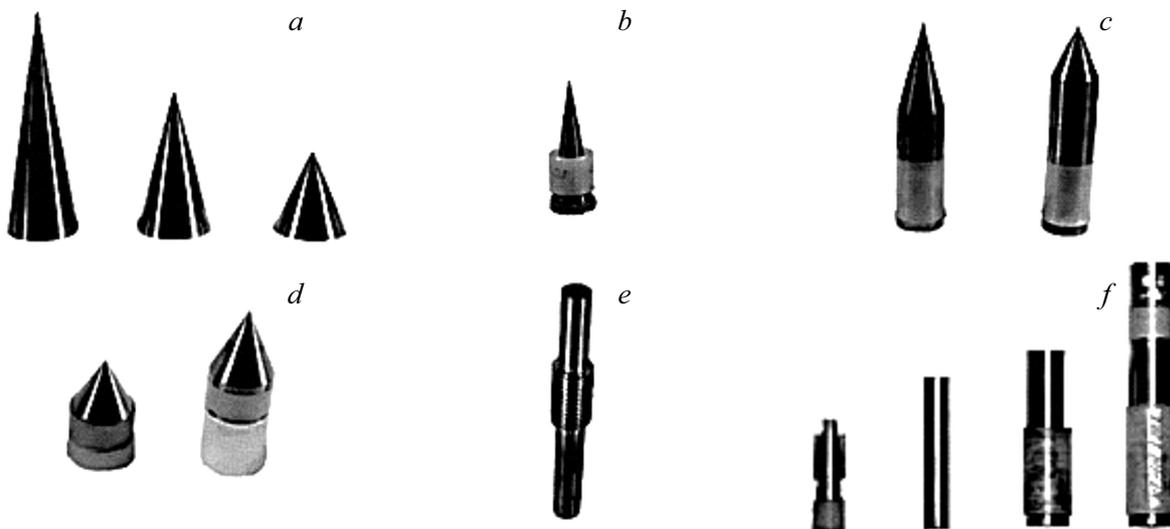
### 1. Проведение экспериментов

Для разгона ударников в опытах использовались пушечные ускорители двух типов (рис. 1): пороховые баллистические установки (ПБУ) или двухступенчатая легкогазовая установка (ЛГУ).

Массы метаемых сборок (проникающий тел плюс поддон или обтюрирующая оболочка, используемые для устойчивого движения в баллистическом стволе) составляли 25–200 g при использовании метательных установок с калибром баллистического ствола 14.5 и 23 mm. В опытах на ПБУ калибра 100 mm масса метаемых сбо-



**Рис. 1.** Метательные установки: *a* — ПБУ, калибр 14.5 мм; *b* — ПБУ, калибр 23 мм; *c* — ПБУ, калибр 100 мм; *d-f* — ЛГУ, калибр 23 мм.

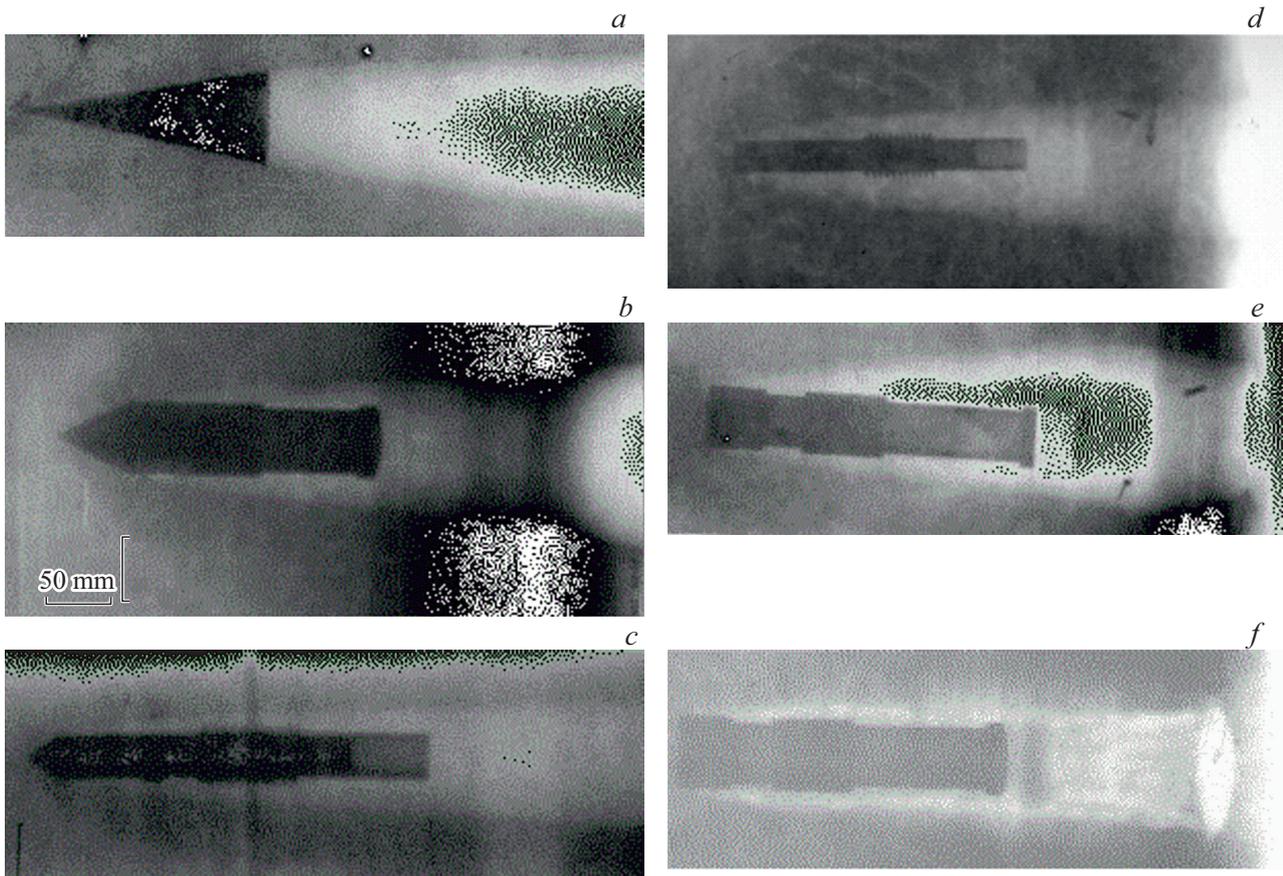


**Рис. 2.** Проникатели (не в масштабе): *a* — конус  $d = 60$  мм, слева направо  $\beta = 10^\circ, 15^\circ$  и  $25^\circ$ ; *b* — конус  $d = 22$  мм,  $\beta = 10^\circ$ ; *c* — цилиндр с коническим наконечником  $d = 22.5$  мм, слева  $\beta = 15^\circ$ , справа  $\beta = 25^\circ$ ; *d* — цилиндр с коническим наконечником  $d = 22.5$  мм, слева  $\beta = 30^\circ$ , справа  $\beta = 25^\circ$ ; *e* — цилиндр  $d = 10$  мм; *f* — цилиндр, слева направо  $d = 7, 10, 14.5$  и  $22.5$  мм.

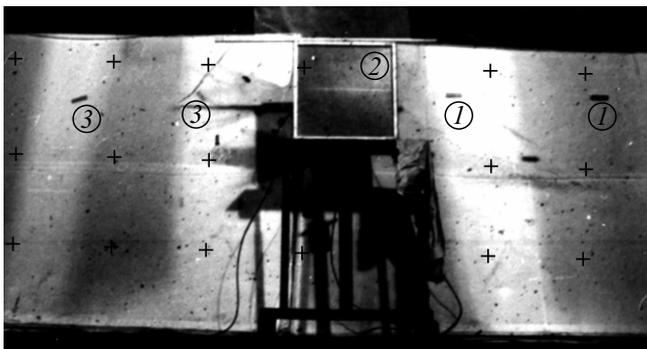
рок конических проникателей достигала  $\sim 2$  kg (конические ударники с углом полураствора  $\beta = 10, 15$  и  $25^\circ$ ). На рис. 2 приведены фотографии основных типов проникателей с указанием диаметра кавитатора проникателя *d* и угла  $\beta$  (для конических проникателей). Большая часть ударников представляла собой цилиндр с коническим наконечником. Цилиндрическая часть использовалась для увеличения массы и обеспечения условий метания из баллистических устано-

вок. Ударники изготовлены из высокопрочной стали ЭП637.

Для определения значения коэффициента сопротивления  $C_x$  использовались две экспериментальные схемы: 1) хронометрирование процесса проникания в грунтовой среде посредством фиксации времени прохождения заданных сечений с помощью индукционных датчиков [3] или по глубине проникания на фиксированный момент времени срабатывания рентгеновского аппарата [4];



**Рис. 3.** Характерные рентгенограммы движения ударников в песке (направление движения — справа налево): *a* — конус  $\beta = 10^\circ$ ,  $m = 39$  г,  $L = 62$  мм,  $d = 22$  мм,  $V_0 = 560$  м/с, грунт-песок с  $\rho_0 = 1.73$  г/см<sup>3</sup>,  $W = 9.3\%$ ; *b* — конус  $\beta = 25^\circ$ ,  $m = 203$  г,  $L = 100$  мм,  $d = 22.5$  мм,  $V_0 = 806$  м/с, грунт-песок с  $\rho_0 = 1.46$  г/см<sup>3</sup>,  $W = 0\%$ ; *c* — конус  $\beta = 30^\circ$ ,  $m = 52.5$  г,  $L = 90$  мм,  $d = 10$  мм,  $V_0 = 1824$  м/с, грунт-песок с  $\rho_0 = 1.57$  г/см<sup>3</sup>,  $W = 0\%$ ; *d* — цилиндр  $m = 57$  г,  $L = 90$  мм,  $d = 10$  мм,  $V_0 = 1112$  м/с, грунт-песок с  $\rho_0 = 1.68$  г/см<sup>3</sup>,  $W = 8.2\%$ ; *e* — цилиндр  $m = 213$  г,  $L = 120$  мм,  $d = 22.5$  мм,  $V_0 = 401$  м/с, грунт-песок с  $\rho_0 = 1.38$  г/см<sup>3</sup>,  $W = 3\%$ ; *f* — цилиндр  $m = 213$  г,  $L = 120$  мм,  $d = 22.5$  мм,  $V_0 = 174$  м/с, грунт-песок с  $\rho_0 = 1.42$  г/см<sup>3</sup>,  $W = 0.3\%$ .



**Рис. 4.** Аэрофотоснимок пробития контейнера с песком цилиндрическим проникающим: 1 — цилиндрический проникающий перед контейнером, 2 — контейнер, 3 — проникающий после пробития контейнера.

2) регистрация скорости ударника  $V_k$  после пробития (прострела) преграды известной толщины  $\Delta h$ .

Для проникающих диаметром  $d \leq 22.5$  мм в качестве мишени использовался контейнер с песчаным грунтом, ширина которого составляла 80–100 мм, что позволяло проводить рентгенографирование процесса проникания. В опытах на прострел в случае использования проникающих с  $d \leq 23$  мм использовался контейнер диаметром 150–300 мм и длиной от 100 до 300 мм. В опытах с коническими проникающими диаметром 60 мм использовался контейнер  $1 \times 1$  м в поперечном сечении глубиной  $\Delta h \approx 400$ –500 мм.

В опытах с фиксацией времени прохождения с помощью индукционных датчиков в контейнере шириной 100 мм устанавливалось от трех до семи сечений датчиков на расстоянии от 50 до 150 мм друг от друга, полная регистрируемая измерительная база составляла 400–500 мм. Чтобы получить полную глубину проникания, в некоторых опытах за контейнером с песком, в котором производилось хронометрирование процесса движения ударника, устанавливался контейнер с песком большего диаметра и длиной до 1 м.

Во всех опытах угол входа  $\theta$  составлял  $\sim 90^\circ$  от поверхности преграды. На рис. 3 приведены характерные рентгенограммы движения проникающих в песчаном грунте плотностью  $\rho_0$  и влажностью  $W$ , указаны скорость удара  $V_0$ , масса  $m$  и диаметр  $d$  проникающего, а также угол полураствора  $\beta$  (для проникающих с коническим кавитатором).

На рис. 4 приведена фотография характерного опыта на прострел преграды.

## 2. Результаты и их обсуждение

При обработке результатов опытов с хронометрированием процесса проникания или с рентгенографированием значение коэффициента сопротивления  $C_x$  считалось постоянным в скоростном интервале конкретного опыта и рассчитывалось с помощью нелинейной (методом наименьших квадратов) аппроксимации экспериментальных данных путь–время конкретного опыта функцией  $h(t)$ , полученной интегрированием уравнения движения при постоянном значении  $C_x$ .

Уравнение прямолинейного движения проникающего как жесткого тела:

$$\frac{dV}{dt} = -C_x S_k \frac{\rho_0 V^2}{2m}, \quad (1)$$

где  $m$  и  $V$  — масса и скорость проникающего,  $S_k$  — площадь поперечного сечения его кавитатора, а  $\rho_0$  — плотность грунта. Интегрирование проводилось в безразмерных переменных

$$\tilde{h} = hA, \quad \text{и} \quad \tilde{t} = tAV_0, \quad (2)$$

где  $A = \frac{\rho_0 S_k}{2m}$ , при постоянном коэффициенте сопротивления  $C_x$  (среднем для интервала глубин от 0 до  $h$ ):

$$\tilde{h}(\tilde{t}) = \frac{1}{C_x} \ln(1 + C_x \tilde{t}). \quad (3)$$

При обработке результатов опытов на прострел значение  $C_x$  также считалось постоянным в интервале изменения скорости от  $V_0$  до  $V_k$  и относится к среднему значению скорости  $V_{av} = (V_0 + V_k)/2$ . По известным значениям коэффициента  $A$ , толщины слоя грунта  $\Delta h$ , измеренным значениям времени движения проникающего в преграде  $t$  и его скорости на входе и выходе  $V_0$  и выходе из нее  $V_k$  значение  $C_x$  вычисляется как

$$C_x = \frac{1}{\Delta h A} \ln\left(\frac{V_0}{V_k}\right). \quad (4)$$

Коэффициент сопротивления  $C_x$  определялся в каждом опыте, и по количеству опытов с близкими параметрами влажности грунта определялось среднее значение  $C_x$ . Также данные опыты сводились в единую обработку закона движения проникающего с данным углом полураствора конуса. Полученное в опытах на прострел значение  $C_x$  использовалось для определения времени  $t$

достижения ударником глубины  $\Delta h$ , чтобы использовать этот опыт в совместной обработке закона движения  $h_i(t_i)$  нескольких опытов с близкими параметрами грунтовой преграды.

Основными параметрами, определяющими погрешность определения  $C_x$  в опытах, являются:

— точность определения координат заданных сечений в грунте для фиксации прохождения ударника с помощью индукционных либо контактных датчиков, глубины проникания по рентгеновскому снимку, а также толщины пробиваемой преграды;

— точность определения срабатывания датчиков, которая выражается через абсолютную среднеквадратическую погрешность  $\Delta t$  (включает погрешность измерительной аппаратуры и неопределенность замыкания датчика, запускающего рентгеновский аппарат, при контакте с моделью).

Абсолютная погрешность координат не превышала 3 мм на уровне  $3\sigma$  [4–7]. Соответственно среднеквадратическая погрешность не превышала  $\sim 1$  мм. Среднеквадратическая погрешность регистрации времени срабатывания датчиков составляла  $0.4 \mu s$  [4–7]. Относительная среднеквадратическая погрешность определения скорости удара  $V_0$  составляет 0.5%. Тем самым максимальная погрешность  $\delta$  в определении экспериментального значения  $C_x$  в конкретном опыте [4,5] с учетом погрешности определения начальной скорости, скорости после пробития преграды, координат заданных сечений в песке, глубины проникания по рентгеновскому снимку, толщины контейнера в опытах на прострел, времени регистрации всех координат движения проникающих оценивается не более  $\pm(5 - 10)\%$ .

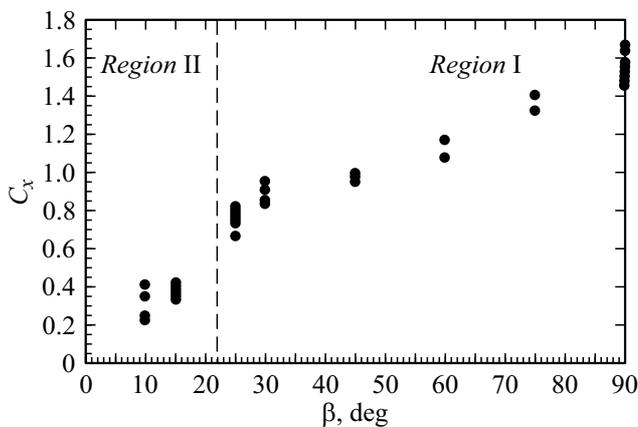
На основе полученных экспериментальных значений  $C_x$  в каждом опыте [4,5] определялись средние значения коэффициента сопротивления по всем опытам для каждого угла полураствора конуса в относительно узком интервале влажности песка. В табл. 1 приведены средние значения экспериментальных коэффициентов сопротивления со среднеквадратическим отклонением (СКО) и коэффициентом вариации  $v$  по количеству проведенных опытов с близкими параметрами грунта. По большинству всех опытов с коническими проникающими средняя плотность и влажность песка составили  $\rho_0 = 1.68 \text{ g/cm}^3$  и  $W = 9.5\%$  соответственно. В опытах с коническими проникающими диаметром от 20 до 60 мм с  $\beta = 10, 15$  и  $25^\circ$  влияние масштаба на  $C_x$  не обнаружено.

На рис. 5 приведены экспериментальные значения  $C_x$ , по которым определялось среднее значение для каждого испытанного конического проникающего в относительно узком диапазоне влажности песчаного грунта (табл. 1).

Для проверки возможной зависимости коэффициента сопротивления  $C_x$  от скорости движения  $V$  проведена дополнительная обработка экспериментальных законов движения проникающих  $h_i(t_i)$ , которые аппроксимировались функцией  $h(t)$ , являющейся решением уравнения движения (1) при трех вариантах функции  $C_x = C_x(V)$ :

**Таблица 1.** Коэффициент сопротивления проникателей при движении в песке средней влажности

$\beta$	$\rho, \text{g/cm}^3$		$W, \%$		$V, \text{m/s}$		$C_x$	СКО	$v, \%$	Количество опытов
	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее				
10°	1.56–1.73	1.68	7.0–11.5	9.5	~ 200–1000	630	0.300	0.076	25.3	6
15°	1.57–1.70	1.63	7.4–11.2	8.8	~ 500–950	675	0.379	0.034	9.0	4
25°	1.51–1.76	1.66	7.2–11.4	8.4	~ 300–2100	770	0.764	0.034	4.4	13
30°	1.59–1.70	1.68	6.5–8.0	6.8	~ 350–2200	1300	0.881	0.046	5.3	5
45°	1.67–1.78	1.72	10–12.5	11.4	~ 300–800	550	0.960	0.021	2.2	4
60°	1.64–1.78	1.69	11–12.0	11.7	~ 350–800	575	1.134	0.053	4.7	3
75°	1.64–1.73	1.69	9.0–11.0	10.0	~ 350–800	575	1.355	0.063	4.6	3
90°	1.58–1.72	1.69	7.6–11.0	9.5	~ 300–1100	700	1.559	0.058	3.7	9



**Рис. 5.** Зависимость экспериментального коэффициента сопротивления от угла полураствора конического наконечника.

Первый вариант функции  $C_x = C_x(V)$ :

$$C_x = \text{const.} \tag{5}$$

В этом случае используется решение (3). По экспериментальным данным методом наименьших квадратов подбирается коэффициент аппроксимации  $C_x$ .

Второй вариант функции  $C_x = C_x(V)$ :

$$C_x(M) = bM^\gamma, \tag{6}$$

где  $M = V/a_0$  — число Маха ( $a_0$  — скорость звука в песке), а  $b = C_x(M \rightarrow 1)$  ( $M = 1$  — нижняя граница рассматриваемого нами диапазона скоростей проникания в песок). По экспериментальным данным методом наименьших квадратов подбираются коэффициенты аппроксимации  $b$  и  $\gamma$ . В этом случае зависимость безразмерной глубины проникания от безразмерного времени следующая:

$$\tilde{h}(\tilde{t}) = \frac{1}{b\gamma} M^\gamma. \tag{7}$$

Значение скорости звука в песке (в km/s) рассчитывается по эмпирической зависимости [8]

$$A_0 = 0.28 \left( \frac{\alpha_{10}}{\alpha_{10} + \alpha_{20}} \right)^{-0.54} \tag{8}$$

через значения объемных долей воздуха  $\alpha_{10}$  и воды  $\alpha_{20}$ , которые вычисляются по измеренным перед опытом значениям плотности  $\rho_0$  и влажности  $W$  грунта как [8]

$$\alpha_{20} = \frac{\rho_0 W}{(1 + W)\rho_{20}}, \quad \alpha_{30} = \frac{\rho_0}{(1 + W)\rho_{30}},$$

$$\alpha_{10} = 1 - (\alpha_{20} + \alpha_{30}). \tag{9}$$

Песчаный грунт рассматривается как трехкомпонентная среда с начальной плотностью  $\rho_0$  и влажностью  $W$ :

$$\rho_0 = \alpha_{10}\rho_{10} + \alpha_{20}\rho_{20} + \alpha_{30}\rho_{30}. \tag{10}$$

Плотность твердого компонента (кварц)  $\rho_{30} = 2.65 \text{ g/cm}^3$ , жидкого (вода)  $\rho_{20} = 1.0 \text{ g/cm}^3$ .

Третий вариант функции  $C_x = C_x(V)$ :

$$C_x(V) = C_0 + 2H_d/(\rho_0 V^2), \tag{11}$$

где  $C_0 = C_x(V \rightarrow \infty)$ ,  $H_d$  — прочность преграды, используемая в записи силы сопротивления в форме Понселе [3]. По экспериментальным данным методом наименьших квадратов подбираются коэффициенты аппроксимации  $C_0$  и  $H_d$ . В этом случае зависимость безразмерной глубины проникания от безразмерного времени следующая:

$$\tilde{h}(\tilde{t}) = \frac{1}{C_0} \ln \left| \cos \left( \tilde{t} \sqrt{\frac{2C_0 H_d}{\rho_0 V_0^2}} \right) + \sqrt{\frac{C_0 \rho_0 V_0}{2H_d}} \sin \left( \tilde{t} \sqrt{\frac{2C_0 H_d}{\rho_0 V_0^2}} \right) \right|. \tag{12}$$

В табл. 2 представлены результаты обработки экспериментальных данных закона движения  $h_i(t_i)$  по нескольким опытам для каждого исследованного типа проникателей для трех вариантов зависимости  $C_x$  от скорости движения.

Полученные значения показателей степени аппроксимации  $\gamma$  показывают, что для конических проникателей с  $\beta = 10^\circ$  и  $15^\circ$  коэффициент сопротивления заметно растет с уменьшением скорости. Для проникателей с более тупым ( $\beta \geq 25^\circ$ ) коническим кавитатором и для

**Таблица 2.** Коэффициент сопротивления проникателей при разной скорости движения в песке

$\beta$	Интервал скорости проникания	Интервал плотности $\rho_0$ , g/cm <sup>3</sup>	Интервал влажности $W$ , %	$C_x = \text{const}$	$C_x = bM^\gamma$		$C_x = C_0 2H_d/\rho_0 V^2$	
					$b$ ( $a_0$ , m/s)	$\gamma$	$C_0$	$H_d$ , МПа
10°	300–1000	1.56–1.73	7.0–11.5	0.376	0.512(261)	0.622	0.189	30.0
15°	500–950	1.57–1.70	7.5–11.2	0.354	0.569(253)	0.403	0.293	31.9
25°	250–2100	1.51–1.73	7.2–11.4	0.784	0.800(253)	0.026	0.769	2.0
30°	400–2100	1.59–1.70	6.5–8.0	0.869	0.875(245)	0.004	0.854	13.0
45°	300–800	1.67–1.78	10.0–12.5	0.956	0.999(280)	0.06	0.948	7.6
60°	400–800	1.64–1.78	11–12	1.113	1.122(277)	0.01	1.102	6.5
75°	300–800	1.64–1.73	9–11	1.354	1.360(265)	0.007	1.289	7.8
90°	200–1000	1.33–1.66	0–0.6	2.558	2.606(208)	0.017	2.278	9.5
	250–1200	1.58–1.75	7.6–11.0	1.510	1.561(262)	0.036	1.504	18.9
	250–900	1.62–1.86	11.4–16.7	1.398	1.439(313)	0.062	1.346	8.6

проникателей с плоским передним торцом ( $\beta = 90^\circ$ ), зависимостью  $C_x$  от  $V$  можно пренебречь: в исследованном диапазоне скоростей проникания  $\gamma \approx 0$  в пределах экспериментальной погрешности [4,5]. Отсутствие зависимости коэффициента сопротивления проникателя от его скорости можно считать справедливым только для исследованного интервала скоростей проникания ( $0.2 \leq V_0 \leq 2.0$ ) km/s. Для песчаного грунта этот скоростной диапазон соответствует сверхзвуковому движению. При уменьшении скорости движения (в случае песка — дозвуковой режим) наблюдается существенное увеличение значения  $C_x$  (см., например, [3,9]).

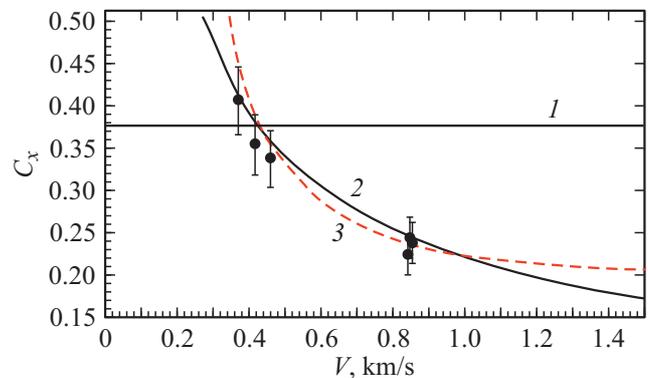
На рис. 5 можно выделить две характерные области значений угла полураствора конического наконечника  $\beta$  из всего диапазона углов полураствора ( $0 < \beta \leq 90^\circ$ ), границей раздела этих областей будем считать угол  $\beta = \beta_{**}$  проникателя, перед которым формируется отошедшая головная ударная волна (УВ): при  $\beta_{**} \leq \beta \leq 90^\circ$  (область I на рис. 5, движение с отошедшей УВ) зависимостью коэффициента сопротивления от скорости проникания можно пренебрегать, а при  $0 < \beta < \beta_{**}$  (область II на рис. 5, движение с присоединенной УВ) необходимо учитывать зависимость коэффициента сопротивления от скорости движения (числа Маха). Значение угла  $\beta_{**}$  определяется по эмпирической зависимости [10]

$$\beta_{**} = \arcsin[(\lambda/1.6)^{5/9}], \quad (13)$$

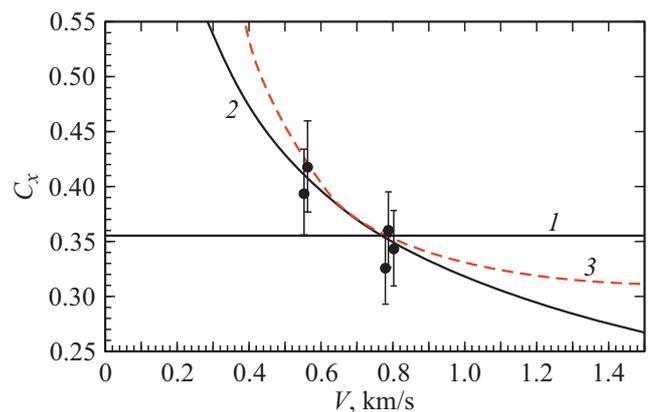
причем коэффициент относительного сжатия  $\lambda$  трехкомпонентной среды в первом приближении можно принять равным объемному содержанию воздуха в песке:  $\lambda \approx \alpha_{10}$ .

На рис. 5 отмечено значение угла  $\beta_{**} = 22^\circ$ , вычисленное по формулам (13) и (9) для средних в опытах с коническими проникателями значений плотности и влажности грунта  $\rho_0 = 1.68 \text{ g/cm}^3$  и  $W = 9.5\%$  ( $\lambda \approx 0.275$ ).

На рис. 6–9 приведены экспериментальные значения  $C_x$ , полученные в конкретных опытах для сред-

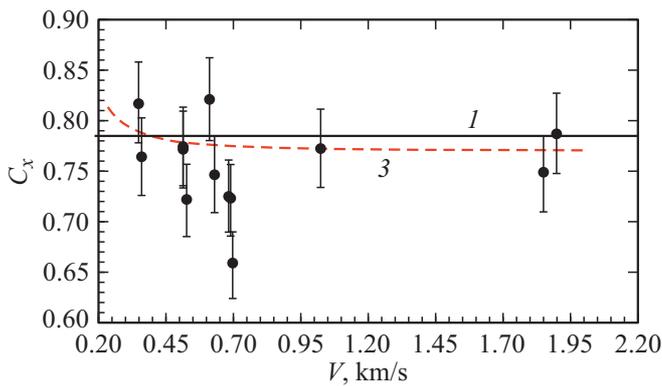


**Рис. 6.** Зависимость  $C_x$  от скорости проникания конуса  $\beta = 10^\circ$ : • — эксперимент (разброс  $\delta = \pm 10\%$ ); 1 —  $C_x = \text{const}$ ; 2 —  $C_x(M) = bM^{-\gamma}$ ; 3 —  $C_x(V) = C_0 + 2H_d/(\rho_0 V^2)$ .

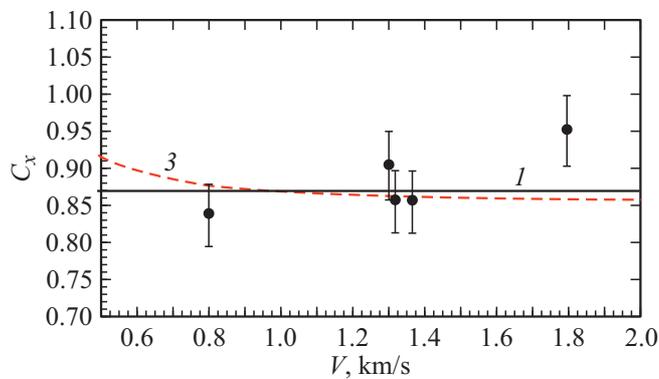


**Рис. 7.** Зависимость  $C_x$  от скорости проникания конуса  $\beta = 15^\circ$ : • — эксперимент (разброс  $\delta = \pm 10\%$ ); 1 —  $C_x = \text{const}$ ; 2 —  $C_x(M) = bM^{-\gamma}$ ; 3 —  $C_x(V) = C_0 + 2H_d/(\rho_0 V^2)$ .

ней скорости движения проникателя, и графики аппроксимационных зависимостей  $C_x(V)$  для четырех уг-



**Рис. 8.** Зависимость  $C_x$  от скорости проникания конуса  $\beta = 25^\circ$ :  $\bullet$  — эксперимент (разброс  $\delta = \pm 5\%$ );  $1$  —  $C_x = \text{const}$ ;  $3$  —  $C_x(V) = C_0 + 2H_d/(\rho_0 V^2)$ .



**Рис. 9.** Зависимость  $C_x$  от скорости проникания конуса  $\beta = 30^\circ$ :  $\bullet$  — эксперимент (разброс  $\delta = \pm 5\%$ );  $1$  —  $C_x = \text{const}$ ;  $3$  —  $C_x(V) = C_0 + 2H_d/(\rho_0 V^2)$ .

лов полураствора конического наконечника проникателя:  $\beta = 10, 15, 25$  и  $30^\circ$  соответственно. Зависимости  $C_x(V)$  определялись аппроксимацией экспериментальных значений  $h_i(t_i)$  по всем опытам с проникателями одного угла полураствора конического наконечника, значения параметров аппроксимаций  $C_x(V)$  приведены в табл. 2. Видно, что при  $\beta = 10$  и  $15^\circ$  коэффициент сопротивления существенно зависит от скорости движения, а при  $\beta = 25$  и  $30^\circ$  — практически не зависит.

## Заключение

Таким образом, анализ результатов экспериментов по определению коэффициента сопротивления  $C_x$  конических и цилиндрических ударников (всего восемь типов ударников) при проникании в песчаный грунт (для конических ударников — в песчаный грунт средней влажности  $W = 7\text{--}12\%$ , для ударника с плоским передним торцом — в песчаный грунт влажностью  $W$  от 0 до 16%) выявил (при экспериментальной погрешности не более  $\pm 10\%$ ) существенную зависимость  $C_x$  от скорости проникания  $V$  только для острых конусов (угол

полураствора  $\beta < 25^\circ$ ) и отсутствие таковой для тупых конусов ( $\beta \geq 25^\circ$ ) и ударника с передним плоским торцом ( $\beta = 90^\circ$ ). Скорость ударника  $V$  изменялась в интервале (0.2–2.0) km/s, что соответствует сверхзвуковому движению в песчаном грунте.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.А. Велданов, В.Е. Смирнов, О.Б. Хаврошкин. *Астрономический вестник*, **33** (5), 490 (1999).
- [2] В.А. Велданов, С.В. Федоров. *Прикладная механика и техническая физика*, **46** (6), 116 (2005).
- [3] У. Аллен, Э. Мейфилд, Г. Моррисон. Сборник переводов „Механика“, **6**, 125 (1957).
- [4] В.А. Бердников, Ю.Ф. Травов, Г.Ф. Копытов, М.В. Каминский, В.А. Могилев, Ю.И. Файков, Ю.А. Фатеев. *Экспериментальное исследование движения конусов и цилиндра в песчаной среде*. Сборник материалов II научной конференции РАН „Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения“ (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2002), с. 276.
- [5] А.М. Близинок, Г.Ф. Копытов, Ю.В. Кочнев. *Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук*, **4** (49), 34 (2006).
- [6] А.В. Зубанков, С.И. Герасимов. *Приборы и Техника Эксперимента*, **3**, 30 (2019).
- [7] С.И. Герасимов, Д.В. Захаров, А.В. Зубанков, В.А. Кикеев, Е.С. Хорошайло. *Научная визуализация*, **10** (2), 1 (2018).
- [8] Л.С. Евтерев, Б.В. Замышляев. *Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред* (Наука, М, 1990).
- [9] Ю.Н. Бухарев, В.П. Гандурин. *Анализ сил, действующих на ударники с конической, полусферической и плоской носовыми частями в нестационарной стадии внедрения в воду и грунт / Прикладные задачи высокоскоростного удара*. Под ред. Ю.Н. Бухарева. (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2011), С. 155–170.
- [10] У.Д. Хейз, Р.Ф. Пробстин. *Теория гиперзвуковых течений* (ИЛ, М, 1962).