

05

## Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду

© Вл.В. Баландин, Вл.Вл. Баландин, А.М. Брагов, В.Л. Котов

Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: balandin@mech.unn.ru

(Получена 2015 г. Принята к печати 2016 г.)

Представлен экспериментальный комплекс для определения основных параметров процесса удара и проникания твердых деформируемых тел в мягкие грунтовые среды на основе методики обращенного эксперимента с использованием мерного стержня и методики прямого эксперимента с фоторегистрацией с применением теневых картин процесса взаимодействия ударника с грунтовой мишенью. Для верификации методик проведены численные расчеты процессов соударения твердых тел с грунтом и определены временные интервалы, на которых изменение силы сопротивления пропорционально квадрату скорости внедрения. Показано соответствие значений коэффициента сопротивления внедрению, полученных в прямых и обращенных экспериментах в диапазоне скоростей соударения от 80 до 400 м/с, что подтверждает работоспособность методик и достоверность измерения интегральных нагрузок.

### Введение

Определение контактных сил и ускорений, возникающих при взаимодействии ударника с мишенью, является важнейшей задачей динамики удара [1]. Особое значение в решении подобных задач имеют экспериментальные методы, которые можно разделить на две группы: прямые и обращенные. В прямых экспериментах разогнанный ударник взаимодействует с неподвижной мишенью. В обращенных методах ударник неподвижен (по крайней мере, в начальный момент времени), а удар наносится разогнанной до нужной скорости преградой из исследуемого материала. Изучение высокоскоростного проникания твердых тел в грунтовые среды является сложной задачей в связи с большим разнообразием их физико-механических свойств. Одной из наиболее распространенных и хорошо изученных грунтовых сред является песок [2]. Однако ударное взаимодействие твердых тел с преградами из песка экспериментально изучено не достаточно полно. Начало широкомасштабным исследованиям в этой области было положено в 1957 г. пионерскими работами У. Аллена и др. [3,4]. В этих работах с использованием рам-мишеней исследовалось проникание цилиндрических ударников с коническими оголовками в сухой песок при скоростях удара 700–800 м/с и определялись параметры уравнения движения. Коэффициент сопротивления внедрению получен в работах [5,6], где представлены результаты прямых экспериментов с цилиндрическими ударниками при скоростях удара 80–460 м/с с использованием рентгеновской съемки.

Процессы образования каверны изучались в [7] при соударении латунного цилиндра и медной сферы с песчаной мишенью, определялись скорости движения

частиц песка и напряжения внутри контейнера с песком. Напряжения, возникающие в мишени из песка при ударе и проникании стального цилиндра с полусферическим оголовком, получены также в работе [8]. Методом цифровой спекл-радиографии регистрировались перемещения частиц песка, возникающие в мишени при ударе цилиндром, оживалом и полусферой со скоростью около 200 м/с [9]. По результатам рентгеновской съемки процесса проникания определялась также глубина проникания в заданные моменты времени.

Значительное количество работ посвящено определению конечной глубины проникания [10–13]. Известны результаты [10] измерения конечных глубин внедрения стальных шариков в сухой песок, на основании которых выделены характерные интервалы изменения зависимости глубины проникания от скорости удара, наличие которых связывается со скоростью звука в песке ( $\sim 120$  м/с). Ранее в экспериментах [3] также было выявлено наличие пороговой скорости 100 м/с, при которой сила сопротивления претерпевает разрыв, связанный, по мнению авторов [3], с переходом от квазиупругого к неупругому деформированию частиц песка.

В [11] исследовано проникание стального диска в песок в диапазоне скоростей 150–1200 м/с, в результате получены зависимости глубины внедрения от времени, конечные глубины проникания и давление на стенках контейнера. В работе [12] проведена серия экспериментов по внедрению ударников различной формы (сферы, цилиндра и оживала) в сухой песок при скоростях удара от 850 до 3000 м/с. В этих опытах была определена критическая скорость, при превышении которой конечная глубина внедрения уменьшается вследствие пластической деформации ударника. В экспериментах [13] фиксировались конечные глубины проникания цилиндриче-

ских ударников с плоским торцом и полусферическим оголовком в песок.

Таким образом, можно отметить, что в экспериментальных исследованиях процессов соударения твердых тел с преградами чаще всего регистрируют глубину внедрения в зависимости от времени [3–6,9], конечную глубину внедрения [10–13], изменение скорости в процессе проникания [14–16], ускорение ударника [16,17].

Для регистрации перемещения ударника в прямых экспериментах используются метод рам-мишеней [3,4] и его модификации [5,6,11], высокоскоростная кино- и рентгеновская съемки [5–7,9,11]. Интегральные нагрузки, действующие на ударники различной формы на квазистационарной стадии внедрения, определяются с использованием зависимостей глубины проникания от времени и уравнений движения в форме Понселе или Резаля [3,6,17]. Однако эти методы не позволяют достоверно определять силовые характеристики на начальном нестационарном участке и, как показано в [11], не учитывают влияния стенок контейнера с грунтом на интегральные нагрузки и конечные глубины проникания.

Для измерения скорости ударника в процессе внедрения используются интерферометрические методы в прямом [14] и обращенном экспериментах [15]. Данные методы достаточно сложны, хотя и обладают высокой точностью при измерении скорости движения. Однако для получения интегральных нагрузок требуется дифференцирование полученных зависимостей скорости проникания от времени, что может привести к существенному увеличению погрешности. Для непосредственного измерения сил, действующих на твердое тело на начальном этапе внедрения, чаще всего применяются акселерометры [16,17] в прямом и обращенном экспериментах. Следует отметить, что в прямых экспериментах при достаточных больших скоростях соударения ударников с мишенями трудно обеспечить надежную регистрацию сигнала с датчиков, размещенных на движущихся ударниках.

От этого недостатка свободны методика измерений ускорений в обращенном эксперименте — в этой постановке ударник с акселерометром неподвижен по крайней мере в начальный момент времени. Существенным недостатком обращенных методик [15,18] является необходимость разгонять контейнеры с грунтом достаточно большой массы и небольшими геометрическими размерами, позволяющими регистрировать только нестационарную фазу внедрения.

В целом можно отметить, что вопрос определения интегральных нагрузок при движении твердых тел в песчаных средах экспериментально исследован недостаточно. Для решения данной проблемы предлагается использовать экспериментальный комплекс, реализующий измерение основных параметров процесса проникания в прямой и обращенной постановках. Сочетание двух методик позволяет подробно исследовать общую картину взаимодействия ударника с грунтовыми мишенями и измерять интегральные нагрузки, действующие на ударник на нестационарном начальном этапе внедрения и на квазистационарной стадии.

## 1. Экспериментально-измерительный комплекс

Для определения силовых характеристик внедрения твердых деформируемых тел использовались две взаимодополняющие методики. Первая — методика, реализующая обращенный эксперимент с использованием мерного стержня, позволяющая измерять интегральные нагрузки на начальном этапе внедрения [18], вторая — методика прямого эксперимента с фоторегистрацией [19,20] позволяет получать теневую картину процесса взаимодействия ударника с грунтовой мишенью и далее по этой картине строить зависимость глубины проникания от времени и определять коэффициент сопротивления внедрению на квазистационарном участке проникания.

### 1.1. Методика мерного стержня в обращенном эксперименте

В обращенном эксперименте проводилось измерение силы сопротивления на начальном участке внедрения. Методика измерения силы сопротивления внедрению ударника в песок с помощью мерного стержня сводится к следующему [18]. Контейнер, заполненный песком, разгоняется до нужных скоростей и наносит удар по неподвижному ударнику, закрепленному на мерном стержне. Скорость удара и свойства материала стержня должны быть такими, чтобы в стержне не возникало пластических деформаций. При этом в стержне формируется упругий импульс деформаций  $\varepsilon(t)$ . Регистрация этого импульса позволяет определить усилие  $F$ , действующее на ударник при взаимодействии со средой, по известному соотношению  $F(t) = E\varepsilon(t)S$ , где  $E$  — модуль упругости стержня,  $S$  — площадь его поперечного сечения. Таким образом, в этом методе задача измерения сил существенно упрощается и сводится к регистрации импульса упругих деформаций в стержне с помощью тензорезисторов. Схема установки, с помощью которой реализован этот метод, представлена на рис. 1. В предлагаемом варианте обращенного эксперимента для разгона контейнера с грунтом используется газовая пушка 1 калибром 57 мм с двухдиафрагменным

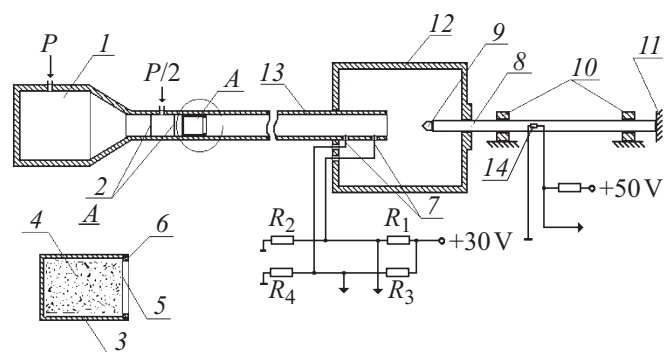


Рис. 1. Схема установки для измерения сил сопротивления внедрению в обращенном эксперименте.

затвором 2, позволяющая получать стабильные и легко контролируемые скорости соударения в диапазоне от 50 до 500 m/s.

Контейнер представляет собой тонкостенный стакан из алюминиевого сплава Д16-Т 3, заполненный грунтовой средой 4. Чтобы предотвратить высыпание грунта в процессе подготовки эксперимента и во время разгона контейнера, передняя часть контейнера закрывается лавсановой пленкой 5 толщиной 0.01 mm. Пленка фиксируется и поджимается к поверхности грунта с помощью винипластового кольца 6.

Скорость удара контейнером определялась с помощью двух электроконтактных датчиков 7, расположенных в отверстиях ствола, высверленных перед его дульным срезом. В качестве мерного стержня 8 для измерения сил используется стальной стержень длиной 1.5 m и диаметром 20 mm с пределом текучести более 2000 МПа. Один из торцов мерного стержня имеет резьбовое отверстие (М10), в которое ввинчивается цилиндрический ударник с головной частью необходимой формы 9. Стержень располагается на некотором расстоянии от дульного среза ствола так, чтобы соударение происходило сразу после полного вылета контейнера из ствола. Подставка, на которой располагается стержень, имеет юстировочные опоры 10, что позволяет обеспечивать осесимметричный характер взаимодействия. Стержень своим задним торцом упирается в специальный упор 11, предотвращающий его смещение и гасящий энергию удара. Соударение происходит в вакуумной камере 12, к которой присоединен ствол пушки 13 и в которую вставляется мерный стержень 8 с ударником 9. Головные части ударников диаметром цилиндрической части 19.8 mm и радиусом полусферы 10 mm изготавливались из стали 45 ( $\sigma_T \geq 600$  МПа) и стали ЭП638 ( $\sigma_T \geq 1800$  МПа).

## 1.2. Методика высокоскоростной кинорегистрации в прямом эксперименте

В установке [19,20], реализующей методку прямого эксперимента, (рис. 2) для разгона ударников до требуемых скоростей используется газовая пушка калибром 20 mm. Пушка состоит из камеры высокого давления (КВД) 1, затвора 2 и ствола 3. На дульном конце ствола навинчивается электромагнитный измеритель скорости 4. Вакуумная камера 5 предназначена для предохранения оборудования и персонала от удара разлетающихся осколков или самого снаряда. Кроме того, при испытании грунтовых сред она защищает помещение от разлета частиц грунта и пыли. В камере расположен узел крепления мишени 6, зажимающий контейнер с песком 7 с боков. Процесс соударения освещался с помощью двух импульсных осветителей 8 через рассеивающий экран 9. Теневая картина взаимодействия регистрировалась цифровой высокоскоростной камерой HSFCpro 10, позволяющей получать до 8 последовательных кадров.

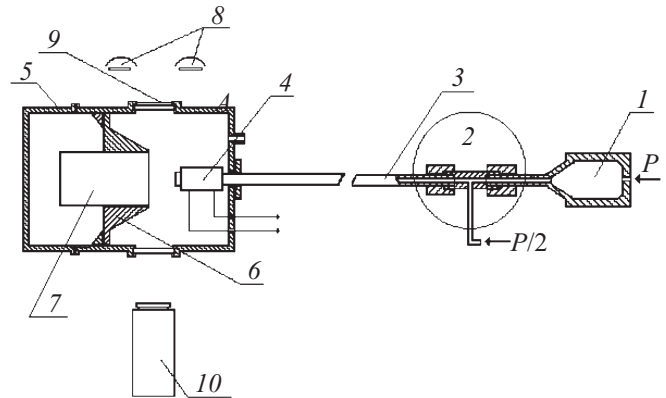


Рис. 2. Схема установки для высокоскоростной фоторегистрации процессов соударения.

Контейнер с песком 7 представлял собой стальной цилиндр внешним диаметром 140 mm, длиной 350 mm и толщиной стенок 5 mm. Для предотвращения высыпания песка его свободная поверхность фиксировалась с помощью лавсановой пленки толщиной 0.01 mm, которая закреплялась на контейнере.

В экспериментах по кинограммам внедрения определялись зависимости глубины проникания от времени, по которым вычислялись параметры уравнения движения в следующей форме:

$$-\ddot{x} = \alpha(\dot{x})^2, \quad (1)$$

где  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ ,  $x$  — ускорение, скорость и глубина внедрения ударника,  $\alpha$  — неизвестный коэффициент. Момент начала интегрирования  $t = 0$  уравнения 1 выбирался так, чтобы исключить влияние начальной нестационарной стадии внедрения, и приблизительно соответствовал моменту погружения головной части ударника в мишень. Скорость  $V$  и координата  $x_0$  в момент времени  $t = 0$  также являются неизвестными и подлежат определению ( $V$  не равно скорости удара  $V_0$ ). Следует отметить, что  $V$  отличалась от скорости удара не более чем на 10% при скоростях выше 150 m/s и не более чем на 20% при меньших скоростях.

При начальных условиях  $\dot{x}(t = 0) = V$ ,  $x(t = 0) = x_0$  имеем следующие выражения для глубины и скорости проникания:

$$x(t) = \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha V t + 1) + x_0,$$

$$\dot{x}(t) = \frac{V}{\alpha V t + 1}. \quad (2)$$

Неизвестные величины  $\alpha$ ,  $V_0$ ,  $x_0$  представлены далее в виде вектора коэффициентов  $\Theta = [\alpha, V, x_0]^T$ .

Компоненты вектора  $\Theta$  определялись итерационно методом Ньютона из системы уравнений

$$\Delta x_k = X_k \Delta \Theta_{k+1}, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

$$\Delta x = \{x_i^* - x_i\},$$

$$X = \left\{ \frac{-x_i + \dot{x}_i t_i}{\alpha}, \frac{\dot{x}_i t_i}{V_0}, 1 \right\}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k + \Delta\Theta_{k+1}, \quad |\Delta\Theta_{k+1}| < \varepsilon,$$

где  $x_i^*$  и  $x_i$  — соответственно значения глубин проникания, полученные в эксперименте и по формуле (2) в моменты времени  $t_i$ ,  $N \geq 4$  — число зарегистрированных в экспериментах моментов времени,  $\varepsilon$  — требуемая точность,  $k$  — номер итерации.

Для решения переопределенной системы уравнений (3) относительно компонент вектора приращений  $\Delta\Theta = [\Delta\alpha, \Delta V, \Delta x_0]^T$  на каждой итерации применялся метод наименьших квадратов

$$\Delta\Theta = (X^T X)^{-1} X^T \Delta x. \quad (4)$$

Погрешности определения компонент вектора коэффициентов  $\Theta = [\alpha, V, x_0]^T$  также определялись в результате решения системы уравнений (4) при  $\Delta x = \pm \Delta x^*$ , где  $\Delta x^*$  — погрешность эксперимента. Решением считались такие величины  $\Delta\Theta$  — интервалы изменения вектора параметров  $\Theta$ , которые при подстановке в (2) давали среднеквадратичное возмущение решения не более  $(\Delta x^*)^2$ .

## 2. Условия проведения экспериментов

Эксперименты проводились с песчаной смесью естественного состава, из которой были удалены частицы крупнее 1 и менее 0.1 мм. Гранулометрический состав песка приведен ниже.

Обращенные эксперименты проводились в диапазоне скоростей соударения от 80 до 400 м/с. Сухой песок (влажностью менее 0.1%) плотностью  $1750 \pm 50 \text{ kg/m}^3$  засыпался в тонкостенные контейнеры из алюминиевого сплава Д16-Т с внешним диаметром 56.8 мм и толщиной стенки 1.3–1.4 мм. Толщина дна контейнера составляла 2–2.5 мм. Высота засыпки грунтом составляла 65–70 мм.

Прямые эксперименты проводились с песком плотностью  $1750 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ . В этих экспериментах использовались ударники с массами  $60 \pm 0.5$ ,  $80 \pm 0.5$  и  $96 \pm 0.5$  г, изготовленные из стали 45 с HR<sub>C</sub>40. Диаметр ударников составлял 19.8 мм, радиус полусферического оголовка — 10 мм. Контейнер представляет собой стальной цилиндр с внутренним диаметром 130 мм и длиной 350 мм. Толщина его стенок и дна составляет 5 мм. Для предотвращения высыпания песка его свободная поверхность фиксировалась с помощью полиэтиленовой пленки толщиной 0.01 мм.

## 3. Результаты численного анализа экспериментальных методик

С целью оценки влияния геометрических размеров ударников контейнеров с грунтом на интегральные нагрузки, а также для более глубокого анализа процессов,

происходящих при соударении твердых тел с грунтом, были выполнены численные расчеты проникания в песчаный грунт ударника массы  $m$  с начальной скоростью  $V_0$ . В расчетах определялся временной интервал, на котором изменение силы сопротивления пропорционально квадрату скорости внедрения. Для этого необходимо было оценить длительность нестационарной стадии изменения силы сопротивления внедрению, а также время, начиная с которого будет существенным влияние на силу сопротивления волн сжатия, отраженных от стенок контейнера.

Расчеты проводились в программном комплексе „Динамика-2“ [21], реализующем математическую модель динамики грунтовой среды Григоряна. Основные соотношения модели записываются в цилиндрической системе координат в виде системы дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса и максимальной плотности, достигнутой в процессе активного нагружения грунта, а также уравнений теории пластического течения с условием пластичности Мизеса [22]

$$\begin{aligned} \rho \, d\rho/dt + \rho(u_{r,r} + u_{z,z}) &= -(\rho u_r)/r, \\ \rho \, du_r/dt - \sigma_{rr,r} - \sigma_{rz,z} &= (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})/r, \\ \rho \, du_z/dt - \sigma_{rz,r} - \sigma_{zz,z} &= (\sigma_{rz})/r, \\ d\rho_*/dt &= d\rho/dt H(\rho - \rho_*) H(d\rho/dt), \\ D_J s_{ij} + \lambda s_{ij} &= 2G e_{ij}, \quad (i, j = r, z), \\ s_{ij} s^{ij} &\leq \frac{2}{3} \sigma_T^2, \end{aligned}$$

где  $t$  — время,  $\rho$  и  $\rho_*$  — начальная, текущая и максимальная плотность, достигнутая в процессе нагружения,  $u_i$ ,  $\sigma_{ij}$ ,  $s_{ij}$ ,  $e_{ij}$  — компоненты вектора скорости, тензора напряжений Коши и девиаторов тензоров напряжений и скоростей деформаций соответственно,  $p$  — давление,  $H$  — функция Хевисайда,  $D_J$  — производная Яумана,  $d/dt$  — полная производная по времени,  $G$  — модуль сдвига,  $\sigma_T$  — предел текучести, по повторяющимся индексам производится суммирование. Параметр  $\lambda = 0$  при упругом деформировании и  $\lambda > 0$ , если реализуется условие пластичности.

Замыкается система конечными соотношениями [21], определяющими динамическую сжимаемость и сопротивление сдвигу грунтовой среды

$$\begin{aligned} p &= f_1(\rho, \rho_*) H(\rho_8 - \rho) H(\rho_0 - \rho), \\ \sigma_T &\equiv f_2(p), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность.

Ударник считается недеформируемым,двигающимся как жесткое тело по нормали к свободной поверхности грунта. Осевая компонента вектора скорости и координата центра масс ударника определяются интегрированием уравнения движения  $-m\ddot{x} = F(t)$ , где  $\ddot{x}$  — ускорение,  $m$  — масса,  $F$  — сила сопротивления внедрению ударника. Величина  $F$  на каждом временном шаге расчетов

Размер зерен, mm	$1.0 > R > 0.63$	$0.63 > R > 0.4$	$0.4 > R > 0.315$	$0.315 > R > 0.2$	$0.2 > R > 0.16$	$0.16 > R > 0.1$
Состав, %	9.8	29.7	20.5	29.5	7	3.5

вычисляется с учетом изменения во времени контактной поверхности в соответствии с контактными алгоритмом „непроницаемости“ по нормали со „скольжением по касательной с сухим трением“ [21,23]

$$\begin{aligned} \dot{u}'_s &= \dot{u}''_s, & q'_s &= -q''_s, \\ q_s &= q'_s = \begin{cases} q_s, & |q_s| \leq k|q_\xi|, \\ k|q_\xi|\text{sign}(q_s), & |q_s| > k|q_\xi|, \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\dot{u}_\alpha$ ,  $q_\alpha$  — компоненты векторов скорости перемещений и контактного давления в местном координатном базисе ( $\alpha = s, \xi$ ),  $s$  — направление касательной,  $\xi$  — нормали,  $k$  — коэффициент трения скольжения, знаки ' и '' обозначает соответствующие величины по разные стороны контакта. Применение условия (6) необходимо при расчете проникания сферического тела, для которого экспериментально показано наличие переходной застойной зоны в окрестности лобовой точки ударника к скольжению с образованием кавитационной полости за счет срыва потока грунта. Система уравнений динамики грунтовой среды дополняется начальными и граничными условиями.

Численное моделирование проводится на основе модифицированного метода Годунова [24,25] с учетом осевой симметрии в постановках, соответствующих натурным прямым и обращенным экспериментам. Функции  $f_1$  и  $f_2$  модели грунтовой среды Григоряна (5) принимаются в виде

$$\begin{aligned} f_1(\rho) &\equiv \rho_0 a^2 \varepsilon / (1 - b\varepsilon)^2, & \varepsilon &\equiv 1 - \rho_0 / \rho, \\ f_2(p) &\equiv \mu p / (1 + \mu p / \sigma_M), \end{aligned}$$

что при значениях параметров  $\rho_0 = 1.75 \text{ g/cm}^3$ ,  $a = 350 \text{ m/s}$ ,  $b = 2.5$ ,  $\sigma_0 = 0$ ,  $\mu = 1.14$ ,  $\sigma_M = 0.275 \text{ GPa}$  соответствует песчаной среде [25–28], коэффициент трения скольжения  $k = 0.4–0.45$ . Объемная разгрузка грунтовых сред с достаточной для практических приложений точностью аппроксимируется линейной зависимостью от плотности, определяемой касательной к ударной адиабате в некоторой предельной (гидродинамической) точке  $\rho_\infty = 2.5 \text{ g/cm}^3$ , модуль сдвига пропорционален разгрузочному модулю [29–31].

Внешние границы расчетной области грунта считаются жесткими и соответствуют геометрии обоймы, используемой в натурном (прямом или обращенном) эксперименте. Область грунта разбивается разностной сеткой на квадратные ячейки с размером сторон  $R/n$ ,  $R$  — радиус цилиндрической части ударника,  $n$  — число ячеек. Для анализа сходимости используемой модификации метода Годунова [24,25] проводилась серия численных расчетов на сгущающихся сетках. Изменение

квазистационарного значения силы в зависимости от размера ячейки  $R/n$  оказалось близко к линейному с достоверностью не менее 0.95, отличие значений сил при  $n = 80$  от прогнозируемого при  $n = \infty$  составило 2–3% [29].

Проведенные ранее расчеты процессов удара и проникания осесимметричных ударников в мягкие грунтовые среды [18,30,31] показали хорошее соответствие численных и экспериментальных результатов, что свидетельствует о достоверности выбранной модели грунта [22] и эффективности применяемого математического и численного аппаратов.

В численных расчетах в постановке, соответствующей прямому эксперименту, масса ударника принимается равной  $m = 80 \text{ g}$ , скорости удара  $V_0 = 100, 150$  и  $200 \text{ m/s}$ .

В расчетах получено, что длительность нестационарной стадии определяется временем  $t_0 = R/V_0$ , где  $R$  — радиус цилиндрической части ударника. Влияние стенок жесткого контейнера в прямых экспериментах сказывается при  $t = 6t_0$  и  $9t_0$  при  $V_0 = 100$  и  $200 \text{ m/s}$  соответственно.

На рис. 3, а пунктирной, штриховой и сплошной линиями приведены расчетные безразмерные сила сопротивления внедрению ( $F/F_0$ ,  $F_0 = 0.5\rho V_0^2 \pi R^2$ ), скорость проникания ( $V/V_0$ ,  $V_0 = 200 \text{ m/s}$ ) и глубина внедрения ( $x/x_0$ ) в зависимости от безразмерного времени ( $t/t_0$ ). Величина  $x_0$  соответствует значению глубины внедрения с начальной скоростью  $200 \text{ m/s}$  на момент времени  $t/t_0 = 9$ , искомым интервал внедрения  $1 < t/t_0 < 9$  или  $50–450 \mu\text{s}$ . Темными маркерами выделены значения глубины проникания, которые в качестве „экспериментальных“ использовались для определения коэффициентов уравнения движения (1), светлыми маркерами — соответствующие значения скорости и силы сопротивления.

На рис. 3, б пунктирными линиями приведены расчетные безразмерные силы сопротивления внедрению ( $F/q$ ,  $q = 0.5\rho V^2 \pi R^2$ ) в зависимости от скорости проникания, отнесенной к  $V_0 = 100, 150$  и  $200 \text{ m/s}$  с соответственно. На квазистационарной стадии внедрения эти значения соответствуют коэффициенту сопротивления  $C$ :

$$C = 2m\alpha / (\rho S), \quad (7)$$

где  $m$  — масса ударника,  $S$  — площадь миделева сечения,  $\rho$  — начальная плотность мишени,  $\alpha$  — коэффициент в формуле (1). Темными маркерами показаны значения  $C$ , рассчитанные на основе предлагаемой методики, которые хорошо соответствуют численным результатам.

На рис. 4 темными точками показана зависимость от времени силы сопротивления внедрению в грунт ударника с полусферической головной частью с начальной

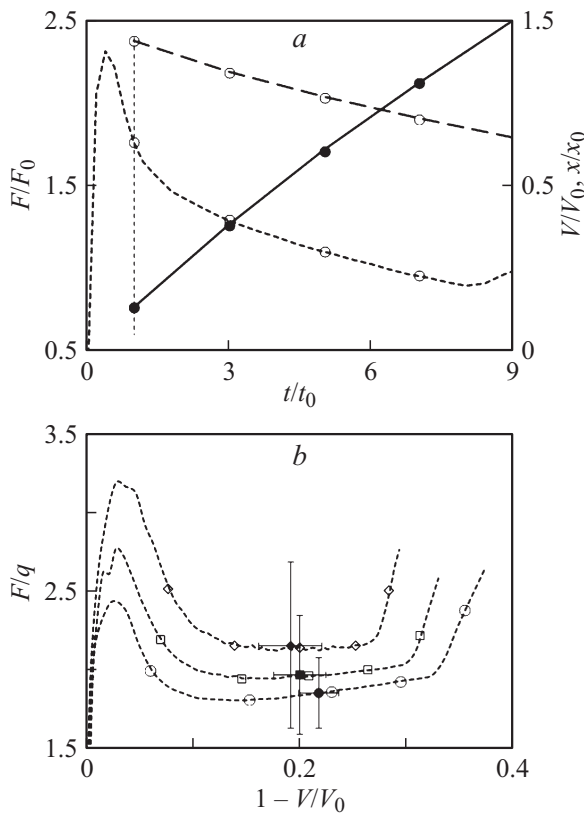


Рис. 3. Результаты численных расчетов проникания жесткой сферы в сухой песок в прямой постановке.

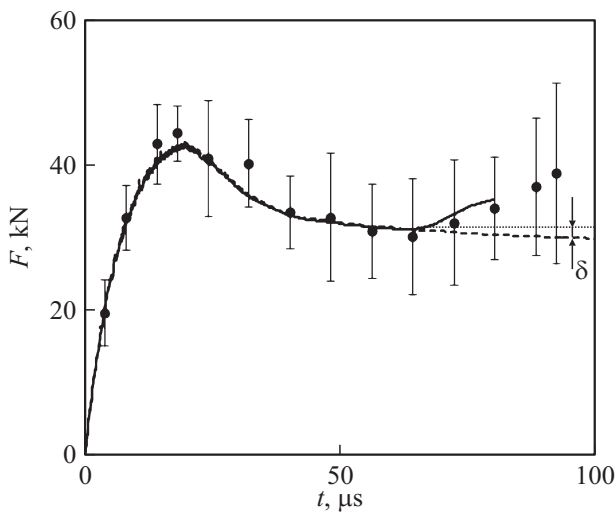


Рис. 4. Результаты экспериментов и численных расчетов проникания жесткой сферы в сухой песок в обращенной постановке.

скоростью  $V_0 = 250 \text{ m/s}$  [30], полученная в обращенном эксперименте. Доверительные интервалы построены по четырем экспериментам с надежностью 0.95. Сплошной и пунктирной линиями приведены результаты численных расчетов проникания в цилиндрический контейнер и полупространство  $F_1$  и  $F_2$  соответственно. Наблюдается

хорошее соответствие численных и экспериментальных результатов, что подтверждает применимость модели грунта при выбранных значениях параметров для расчета процессов проникания со скоростями порядка  $100 \text{ m/s}$ .

Наблюдается практически полное соответствие величин  $F_1$  и  $F_2$ , но при  $t/t_0 > 1.5$  величина  $F_1$  становится больше  $F_2$  вследствие воздействия отраженных от стенок контейнера волн сжатия на контактную поверхность ударника. Величина  $\delta$  на рис. 4 соответствует отличию минимального значения силы  $F_1$  при проникании в контейнер от значения силы  $F_2$  на квазистационарной стадии внедрения, устанавливающегося при  $t/t_0 > 3$ . Было получено, что при скорости удара менее  $100 \text{ m/s}$  величина  $\delta$  примерно равна 20%, а при скорости удара более  $200 \text{ m/s}$  составляет менее 5%, и влиянием стенок контейнера на определяемое в обращенных экспериментах квазистационарное значение силы сопротивления можно пренебречь. Данные результаты уточняют полученные ранее [18]. По результатам расчетов для всех экспериментов были определены временные интервалы, исключая влияние как нестационарной стадии внедрения, так и отраженных от стенок контейнера волн сжатия.

## 4. Результаты экспериментов

### 4.1. Прямые эксперименты

В экспериментах регистрировались кинограммы проникания цилиндрических ударников с полусферической головной частью в мишень из сухого песка. На рис. 5, *a* приведена последовательность кадров кинограммы проникания ударника при скорости удара  $V_0 = 216 \text{ m/s}$ . После обработки результатов экспериментов были получены зависимости глубины проникания от времени (рис. 5, *b*). Погрешность определения во всех экспериментах перемещения заднего торца ударника составляла  $\Delta x^* = 0.15 \text{ mm}$ .

Внешний вид ударников после испытаний (рис. 6) свидетельствует о том, что на носовой части ударников образуется слой раздробленных мелких частиц песка в виде конуса. Следует отметить, что этот слой тем толще (массивнее), чем выше скорость удара. Это явление можно объяснить тем, что в процессе ударного взаимодействия происходит интенсивное разрушение частиц песка, которое, по-видимому, сопровождается существенным повышением температуры этих частиц, что приводит к их спеканию, компактированию и осаждению на поверхности полусферы. Кроме того, в экспериментах не было обнаружено следов взаимодействия грунта с цилиндрической поверхностью ударника и примыкающей к ней частью полусферы, что свидетельствует о кавитационном характере процесса проникания. Последнее обстоятельство может приводить к изменению параметров закона проникновения. Следует особо отметить, что образование присоединенной массы при скорости  $V_0 \sim 140 \text{ m/s}$  имеет случайный характер, что продемонстрировано на рис. 6 для близких скоростей удара  $144$  и  $147 \text{ m/s}$ .



При обработке экспериментальных данных по формулам (3), (4) были получены коэффициенты  $\alpha$  в уравнениях (1) и (2). На рис. 7 приведены значения  $\alpha$  в зависимости от  $V_0$  для ударников различной массы. Максимальные значения относительных погрешностей, определенные в соответствии с (4), составили  $\delta\alpha = \pm 15\text{--}25\%$ , причем с ростом скорости погрешность уменьшается.

В интервале скоростей от 20 до 130 м/с  $\alpha$  уменьшается более чем в 2 раза (с 18 до 8), далее с ростом скорости до 300 м/с уменьшается менее чем в 1.5 раза, что позволяет говорить о наличии некой критической скорости [3,4]. Это связано со сменой режима обтекания при скоростях удара, близких к  $V_0 = 130$  м/с. При малых скоростях внедрения (менее 130 м/с) происходит обтекание полусферы потоком частиц песка без их разрушения. Как указывалось выше, с ростом скорости удара и ростом напряжений увеличивается число разрушенных ча-

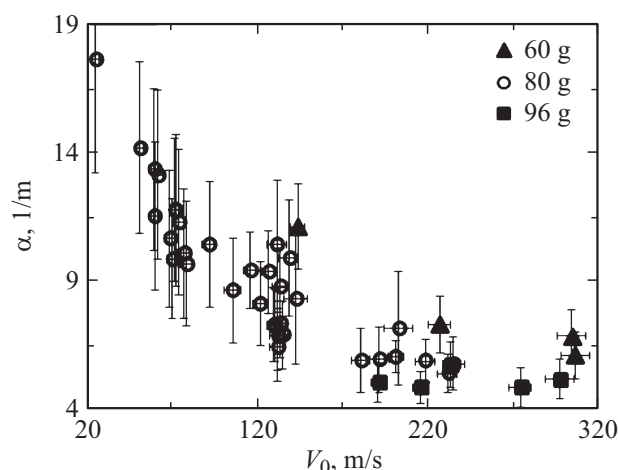


Рис. 7. Зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости.

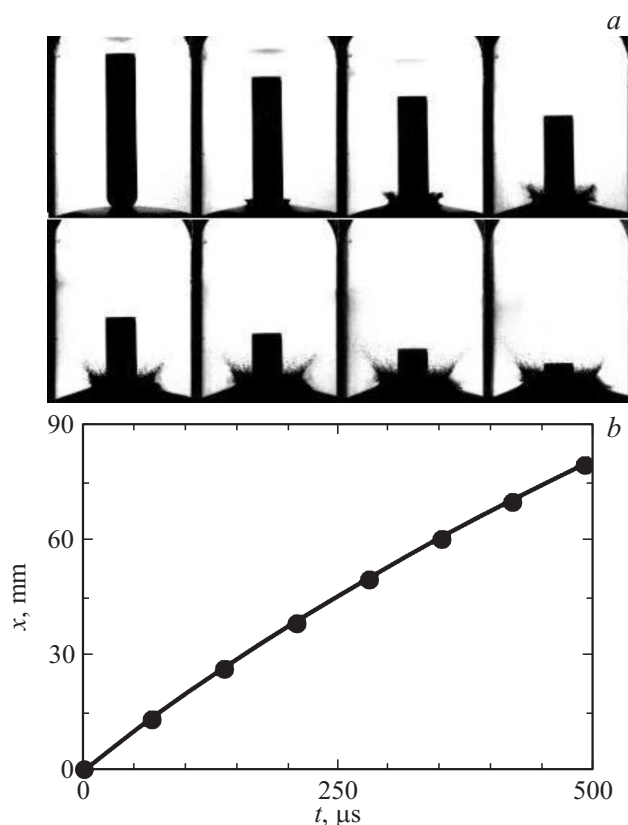


Рис. 5. Кинограмма проникания (а) и зависимость глубины проникания от времени (b) полусферического ударника в сухой песок при скорости удара 216 м/с.

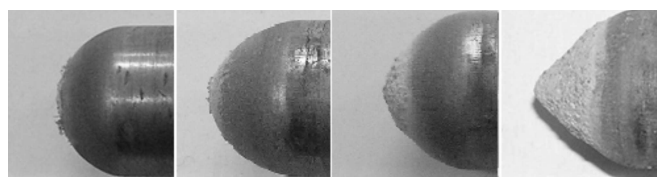


Рис. 6. Головные части ударников после прямых экспериментов при скоростях удара 91, 144, 147 и 271 м/с (слева направо).

стиц, и происходит образование присоединенного конуса из измельченного песка (рис. 6), после этого движение частиц происходит по поверхности присоединенного конуса частиц песка, коэффициент трения которого выше коэффициента трения по металлу, что также может быть причиной изменения закона проникания.

#### 4.2. Результаты обращенных экспериментов

В обращенных экспериментах регистрировались зависимости силы сопротивления от времени при различных скоростях удара (рис. 8). Начальный участок проникновения полусферических ударников в песчаную мишень характеризуется сильной нестационарностью. Об этом свидетельствует характер изменения силы сопротивления во времени, максимальное значение силы сопротивления достигается за время 25–50  $\mu\text{s}$  (с ростом скорости удара время достижения максимума уменьшается). Необходимо отметить, что максимального значения сила сопротивления достигает при заглублении ударника на 5–6 мм, т. е. на 0.5–0.6 радиуса. Далее, как показано выше, происходит отрыв потока от поверхности полусферы и образование вокруг ударника каверны, и в результате этого сила сопротивления при дальнейшем заглублении не растет.

Для малых скоростей удара сила сопротивления внедрению полусферического ударника достигает некоторого стационарного значения при погружении оголовка на 5–6 мм, времена этого процесса составляют 50  $\mu\text{s}$ . Далее следует участок практически постоянной силы длительностью 30–35  $\mu\text{s}$ . После этого, примерно через 100  $\mu\text{s}$  от начала соударения, наблюдается интенсивный рост силы, который связан с приходом отраженных от стенок контейнера волн сжатия.

С увеличением скорости удара до 200 м/с наблюдается увеличение максимальной силы сопротивления. После достижения силой максимума при глубине внедрения, равной 0.6 радиуса ударника, происходит достаточно быстрый ее спад (за время 25–30  $\mu\text{s}$ ), и затем следует

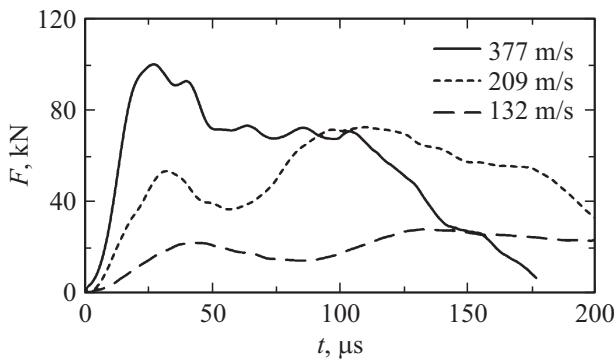


Рис. 8. Зависимости силы сопротивления от времени в обратном эксперименте для полусферического оголовка при скоростях удара 132, 209 и 377 м/с.

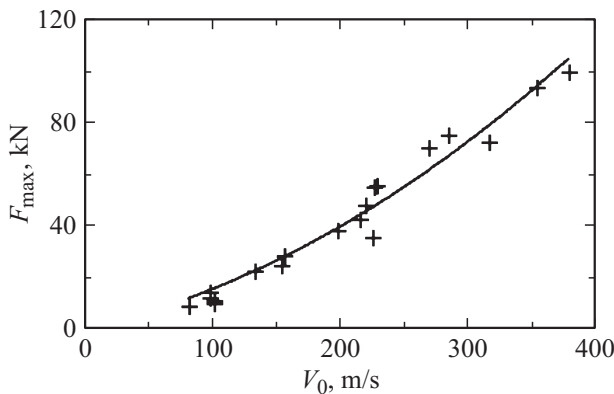


Рис. 9. Зависимость максимальной силы сопротивления от скорости удара, полученная в обратных экспериментах.

участок с мало изменяющейся силой сопротивления. Через 80 μs от начала соударения наступает резкий рост силы, связанный с приходом к ударнику волн сжатия, отраженных от стенок контейнера. Надо отметить, что с ростом скорости удара время прихода к ударнику возмущений от дна контейнера сокращается. Это обстоятельство связано с большей степенью сжатия песка при высоких скоростях и большей в связи с этим, скоростью распространения волн сжатия.

При дальнейшем увеличении скорости (до 350–370 м/с) повторный максимум силы исчезает. По всей видимости, это связано с сильным деформированием и даже разрушением контейнера. После достижения своего максимума сила достаточно быстро уменьшается до некоторого мало меняющегося в дальнейшем значения (рис. 8).

По результатам серии обратных экспериментов была построена зависимость максимальной силы сопротивления внедрению от скорости удара. На рис. 9 приведены экспериментальные значения (отмечены маркерами), которые хорошо аппроксимируются полиномом второй степени (сплошная линия).

Полученные в прямых экспериментах значения α (рис. 7) зависят от массы ударников, и далее были

приведены к безразмерному виду по формуле (7). На рис. 10 приведены значения (светлые кружки) безразмерной силы сопротивления внедрению полусферы в сухой песок (коэффициента сопротивления C<sub>x</sub>) в зависимости от скорости удара. Видно, что значения C<sub>x</sub> для ударников разной массы близки.

Для сравнения на том же рисунке крестиками приведены результаты обращенных экспериментов — значения безразмерной максимальной силы сопротивления (рис. 9), вычисленные по следующей формуле:

$$C_x = \frac{2F}{\rho_0 V_0^2 S}, \tag{8}$$

где F — сила сопротивления, ρ<sub>0</sub> — начальная плотность песка, V<sub>0</sub> — скорость удара, S — площадь миделева сечения. Видно, что отношение максимальной силы сопротивления внедрению к величине силы сопротивления на квазистационарном участке внедрения мало меняется во всем исследованном диапазоне скоростей удара и имеет значение — 1.5–2. Так как на временных зависимостях силы сопротивления (рис. 8) имеется участок с мало меняющейся силой, следующий за максимумом, то для этого квазистационарного участка также определялся коэффициент сопротивления C<sub>x</sub> по формуле (8) (темные кружки на рис. 10). Его значение изменяется в пределах от 4 до 2, что соответствует данным [3,4].

Сравнение значений C<sub>x</sub> показывает, что зависимости, полученные в прямых и обратных экспериментах, близки. Наибольшее отличие не превышает 20% и связано с отмеченным выше влиянием стенок контейнера в обратных экспериментах. С увеличением скорости выше 300 м/с различие практически исчезает. Значение C<sub>x</sub> при скорости 300 м/с равно 1.65 и близко к значению 1.7, полученному из результатов прямых экспериментов с использованием интерферометра PDV [13].

### Заключение

Таким образом, получены новые экспериментальные данные о скоростных зависимостях интегральных нагрузок при проникании цилиндрического твердого тела

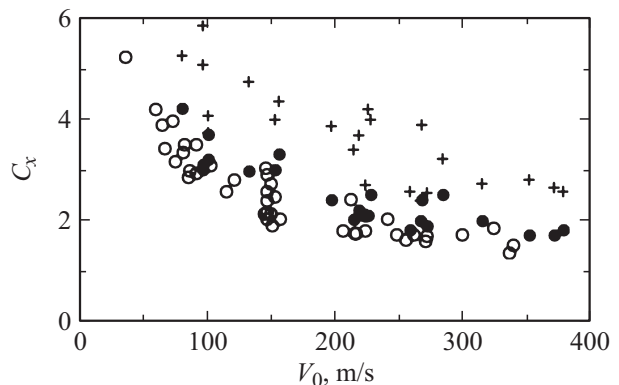


Рис. 10. Зависимости безразмерных сил сопротивления от скорости удара.



с полусферической головной частью, проникающего в сухой песок. Представленные результаты свидетельствуют о том, что использование двух независимых методик позволяет повысить информативность исследований процессов проникания твердых тел в грунтовые среды. Полученные с помощью этих методик экспериментальные результаты существенно расширяют представления о процессах взаимодействия осесимметричных тел с мягкими грунтами. Совместное проведение экспериментальных и расчетных исследований позволяет повысить достоверность получаемых результатов, что открывает широкие возможности по комплексному изучению нелинейных эффектов и закономерностей поведения мягких грунтовых сред при ударе и проникании.

Экспериментальные исследования в прямой постановке выполнены при поддержке РНФ (грант 15-19-10032), обращенные эксперименты выполнены при поддержке РФФИ (грант 15-08-07977), численные расчеты выполнены при поддержке РНФ (грант 14-19-01096).

## Список литературы

- [1] Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. / Под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. М.: Наука, 1974. 344 с.
- [2] *Omidvar M., Iskander M., Bless S.* // Int. J. Imp. Eng. 2012. Vol. 49 P. 192–213.
- [3] *Allen W.A., Mayfield E.B., Morrison H.L.* // J. Appl. Phys. Vol. 28. N 3. P. 370–376.
- [4] *Allen W.A., Mayfield E.B., Morrison H.L.* // J. Appl. Phys. 1957. Vol. 28. N 11. P. 1331–1335.
- [5] *Sierakowski R.L., Malvern L.E., Collins J.A., Milton J.E., Ross C.A.* // Rep. no. AFOSR-78-0164. Washington, DC: US AirForce Office of Scientific Research; Bolling, AFB, 1977. P. 244.
- [6] *Collins J.A., Sierakowski R.L.* // Rep. AFATL-TR-76-122. Eglin Air Force Base, FL: Air Force Armament Laboratory, 1976. P. 23.
- [7] *Borg J.P., Morrissey M.P., Perich C.A., Vogler T.J., Chhabildas L.C.* // Int. J. Imp. Eng. 2013. Vol. 51. P. 23–35.
- [8] *Park H., Chen W.* Dynamic Behavior of Materials. Vol. 1, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 99. 2011. P. 85–92.
- [9] *Collins A.L., Addiss J.W., Walley S.M., Promratana K., Bobaru F., Proud W.G.* et al. // Int. J. Imp. Eng. 2011. Vol. 38. P. 951–963.
- [10] *Бувин Ю.К.* // МТТ. 2008. № 1. С. 154–160.
- [11] *Watanabe K., Tanaka K., Iwane K., Fukuma S., Takayama K., Kobayashi H.* / AFOSR rep. AOARD-094011. Tokyo. Japan, 2011.
- [12] *Savvateev A.F., Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg P.G.* // Int. J. Imp. Eng. 2001. Vol. 26. P. 675–681.
- [13] *Bless S.J., Cooper W., Watanabe K.* // Int'l Symp. on Ballistics, Maimi, FL, USA, 2011. P. 1252–1257.
- [14] *Bless S., Peden B., Guzman I., Omidvar M., Iskander M.* Dynamic behavior of materials. Vol. 1. Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Lombard, IL: Springer, 2014. P. 373–380.
- [15] *Forrestal M.J., Grady D.E.* // Int. J. Sol. Struct. 1982. Vol. 18. N 1. P. 229–234.
- [16] *Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D.* // ASME J. Appl. Mech. 1986. Vol. 53. N 2. P. 317–320.
- [17] *Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 97–104.
- [18] *Баженов В.Г., Котов В.Л., Баландин В.В., Крылов С.В., Брагов А.М., Цветкова Е.В.* // Изв. СО РАН. ПМТФ. 2001. Т. 42. № 6. С. 190–198.
- [19] *Баландин В.В.* // Проблемы прочности и пластичности. 2013. Вып. 75. С. 232–237.
- [20] *Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин В.В., Баландин В.В.* // ДАН. 2013. Т. 451. Вып. 3. С. 278–282.
- [21] *Баженов В.Г., Зефирова С.В., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р.* // Мат. моделирование. 2000. Т. 12. № 6. С. 67–72.
- [22] *Григорян С.С.* // ПММ. 1960. Т. 24. № 6. С. 1057–1072.
- [23] *Григорян С.С.* // Докл. АН СССР. 1979. Т. 244. № 4. С. 846–849.
- [24] *Абузаров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р.* // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40. № 6. С. 940–953.
- [25] *Баженов В.Г., Котов В.Л.* // Изв. СО РАН. ПМТФ. 2002. Т. 43. № 4. С. 139–149.
- [26] *Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.A., Tsembelis K., Proud W.G.* // Int. J. Imp. Eng. 2008. Vol. 35. N 9. P. 967–976.
- [27] *Брагов А.М., Баландин В.В., Ломунов А.К., Филиппов А.Р.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 11. С. 52–55.
- [28] *Брагов А.М., Ломунов А.К., Сергеевич И.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 12. С. 83–87.
- [29] *Котов В.Л., Баландин В.В., Линник Е.Ю., Баландин В.В.* // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Вып. 73. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2011. С. 51–57.
- [30] *Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л.* // Изв. СО РАН. ПМТФ. 2009. Т. 50. № 6. С. 115–125.
- [31] *Котов В.Л., Баландин В.В., Брагов А.М., Линник Е.Ю., Баландин В.В.* // Изв. СО РАН. ПМТФ. 2013. Т. 54. № 4. С. 114–125.