

УДК 539.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ЛОКАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПРИ ВНЕДРЕНИИ КОНИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ В ПЕСЧАНЫЙ ГРУНТ**

© 2014 г.

Е.Ю. Линник

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

ElenkaLinnik@gmail.com

Поступила в редакцию 01.02.2013

Определены параметры модели локального взаимодействия, описывающей контактные напряжения на поверхности ударника: для нормальных напряжений принята квадратичная зависимость от скорости внедрения, для касательных – модель Кулона. Проведено сравнение полученного ранее решения задачи о расширении сферической полости с учетом динамической сжимаемости и сопротивления сдвигу грунтовой среды с результатами численных расчетов, моделирующих процесс внедрения конических ударников в песчаный грунт в постановке обращенного эксперимента. Показано хорошее соответствие результатов, полученных в численных расчетах и в рамках модели локального взаимодействия при определении силы сопротивления внедрению в случае незначительного отличия максимального и квазистационарного значений.

Ключевые слова: квадратичная модель локального взаимодействия, грунтовая среда, модель Григоряна, ударная адиабата, расширение сферической полости, сила сопротивления внедрению, проникание, конический ударник.

Введение

Модель локального взаимодействия (МЛВ) широко распространена при моделировании процессов удара и проникания тел вращения различной формы в грунтовые среды [1]. Ранее было установлено, что область применимости МЛВ зависит от формы ударника, скорости проникания и свойств среды. В работе [2] показано хорошее соответствие результатов расчетов и МЛВ на основе решения задачи о расширении сферической полости для определения максимума силы сопротивления и нарушение условий применимости моделей на квазистационарной стадии внедрения сферических ударников. Данная работа посвящена решению задачи моделирования процесса проникания конических ударников в мягкий грунт с учетом поверхностного (контактного) и внутреннего трения. Определение параметров модели локального взаимодействия, основанной на использовании квадратичной зависимости нормального напряжения на поверхности тела от скорости проникания, осуществляется на базе полученного ранее [2, 3] решения задачи о расширении сферической полости и аппроксимации методом наименьших квадратов квадратичной зависимости максимальных значений силы сопротивления от скорости внедрения. Применимость модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению конических ударников в грунт показывается

сравнением с результатами численных расчетов в осесимметричной постановке.

**Постановка задачи внедрения
конического ударника в грунт**

Рассматривается задача моделирования процесса внедрения конического ударника с углом полураствора γ в мягкие грунтовые среды с постоянной начальной скоростью V_0 , направленной по нормали к свободной поверхности грунта.

В основе известной модели локального взаимодействия лежит предположение, что каждый элемент поверхности взаимодействует со средой независимо от других участков тела. Нормальное напряжение на поверхности контакта определяется ориентацией элементарной площадки поверхности тела относительно направления скорости невозмущенного потока среды. В данной работе нормальное напряжение рассматривается в виде квадратичной зависимости от скорости внедрения в постановке, аналогичной форме Резаля для силы сопротивления внедрению:

$$\sigma_n = \alpha u^2 + \beta u, \quad (1)$$

где α , β – коэффициенты, характеризующие инерционную и вязкостную составляющие, каждая из которых может иметь преобладающее значение в зависимости от физико-механических свойств среды, формы ударника и нор-

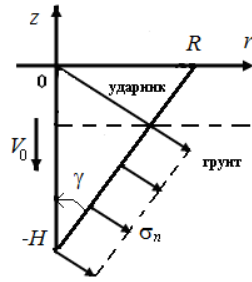


Рис. 1. Схема внедрения конического ударника в грунт

мальной компоненты скорости внедрения u . Свободный член, характеризующий прочность среды, в зависимости (1) опущен в силу его малости для сыпучих сред. Для таких сред при больших скоростях величина нормального напряжения определяется значением параметра α , при малых скоростях – параметра β , оказывающего наибольшее влияние при учете внутреннего трения [4, 5].

Поверхностное трение определяется в соответствии с моделью трения Кулона

$$\sigma_\tau = k_{mp} \sigma_n. \quad (2)$$

Учитывая выражения (1), (2), силу, действующую на конические ударники при внедрении в грунт (рис. 1), свяжем с формой ударника и скоростью внедрения соотношением

$$F = \begin{cases} (1 + k_{mp} \operatorname{ctg} \gamma)(\alpha u^2 + \beta u) \rho_0 S(z), & -1 \leq z \leq 0, \\ (1 + k_{mp} \operatorname{ctg} \gamma)(\alpha u^2 + \beta u) \rho_0 S_0, & z \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$S_0 = \pi R^2, \quad S(z) = \pi(z \operatorname{tg} \gamma)^2, \quad u = V_0 \sin \gamma, \\ z = -1 + V_0 t / H,$$

где S_0 – площадь миделя поперечного сечения конуса, z – текущая глубина проникания, отнесенная к радиусу ударника R , $S(z)$ – площадь поперечного сечения конуса при внедрении на глубину z (рис. 1), ρ_0 – плотность грунта в недеформируемом состоянии.

Аналогично выражению (1) для нормального напряжения зависимость силы сопротивления внедрению от скорости удара соответствует закону проникания в форме Резаля

$$F = aV_0^2 + bV_0, \\ a = \alpha \sin^2 \gamma (1 + \operatorname{ctg} \gamma) \rho_0 S_0, \\ b = \beta \sin \gamma (1 + \operatorname{ctg} \gamma) \rho_0 S_0. \quad (4)$$

Определение параметров α , β модели локального взаимодействия (1) основано на использовании зависимости (3) силы сопротивления внедрению от скорости удара с последующим выражением коэффициентов α , β из формул (4):

$$\alpha = \frac{a}{\pi R^2 \rho_0 \sin^2 \gamma (1 + \operatorname{ctg} \gamma)}, \\ \beta = \frac{b}{\pi R^2 \rho_0 \sin \gamma (1 + \operatorname{ctg} \gamma)}. \quad (5)$$

Для определения параметров α , β модели локального взаимодействия (1) в соответствии с известным подходом также применяется решение одномерной задачи о расширении сферической полости из точки в безграничной среде. Аналитическое решение [2, 3] получено в предположении несжимаемости среды за фронтом ударной волны и учитывает динамическую сжимаемость и сопротивление сдвигу грунта в рамках модели грунтовых сред Григоряна. Динамическая сжимаемость грунта характеризуется ударной адиабатой, сопротивление среды сдвигу определяется линейной зависимостью предела текучести от давления $f = Y_0 + kp$, постоянные коэффициенты Y_0 и k определяют сцепление и внутреннее трение грунта. Ударная адиабата представлена известной зависимостью скорости ударной волны c от массовой скорости u за ее фронтом $c = A + \lambda u$, где константа A характеризует скорость распространения волны сжатия в грунте при малых давлениях, а λ – предельную сжимаемость грунта.

Напряжения на границе полости, расширяющейся со скоростью u , определяются выражением [3]

$$\sigma = -\sigma_0 (1 - \varepsilon^{-2\mu}) / \mu + \\ + \rho_0 u^2 \left(\frac{3}{(\mu - 2)(2\mu - 1)} + \frac{2\mu + 1}{2\mu - 1} \varepsilon^{1-2\mu} - \right. \\ \left. - \frac{\mu - 1}{\mu - 2} \varepsilon^{4-2\mu} \right) (1 - \varepsilon^3), \quad (6)$$

$$\mu = k / (1 + 2/3k), \quad \varepsilon = u/c, \quad c = \lambda^{1/3} u + A/3.$$

Параметры МЛВ определяются аппроксимацией методом наименьших квадратов аналитического решения (6) в диапазоне изменения скорости расширения полости u , соответствующей скорости u в формуле (1).

Сравнение с результатами двумерных численных расчетов

Расчеты в осесимметричной постановке задачи проникания жесткого конического ударника радиуса $R=0.01$ м в песчаный грунт с постоянной скоростью внедрения проводятся при следующих значениях параметров уравнения состояния (УРС) грунта, соответствующих сухой песчаной смеси естественного состава [6]: $A=460$ м/с, $\lambda=2.38$, $\rho_0=1700$ кг/м³, $Y_0=0.01$ МПа, $k=1$. Разгрузка среды описывается двухзвенной ломаной [7, 8]. Приведенное УРС песка позволяет описывать нестационарное деформирование песка в широком диапазоне изменения нагрузки. Ранее это УРС использовалось при исследовании взрывного воздействия на песчаный

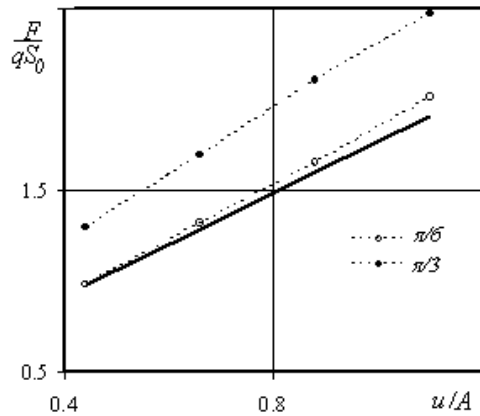


Рис. 2. Зависимости максимальных значений силы сопротивления внедрению конических ударников от скорости внедрения

Таблица

Значения параметров МЛВ

	ЗРП	$\gamma=\pi/6$	$\gamma=\pi/3$
α	1.4	1.6	1.8
β	16.7	12.6	24.4

грунт [7], ударного и волнового взаимодействия в системе разрезных стержней Гопкинсона [8–10].

Численная реализация осуществляется в пакете прикладных программ НИИМ ННГУ «Динамика-2» [11], реализующем метод Годунова, модифицированный для расчета задач динамического деформирования упругопластических грунтовых сред [12, 13].

Сплошной линией на рис. 2 показаны значения силы сопротивления внедрению, полученные на основе зависимости для напряжений (6), отнесенные к величине $q = \rho_0 u A$. Светлым и темным маркерам отвечают линейные аппроксимации численных расчетов для конических ударников с углами полураствора $\gamma = \pi/6$ и $\pi/3$ соответственно.

Из рис. 2 видно, что результаты численных расчетов для малых углов раствора хорошо соответствуют нормальным напряжениям, полученным с использованием решения задачи о расширении сферической полости (ЗРП), для больших углов наблюдается существенное отличие при сходном характере поведения кривых.

Аппроксимацией методом наименьших квадратов аналитического решения (6) в диапазоне изменения скоростей расширения полости $u=200\text{--}500$ м/с и численных результатов получены параметры МЛВ, их значения приведены в таблице. Значения параметров модели, приве-

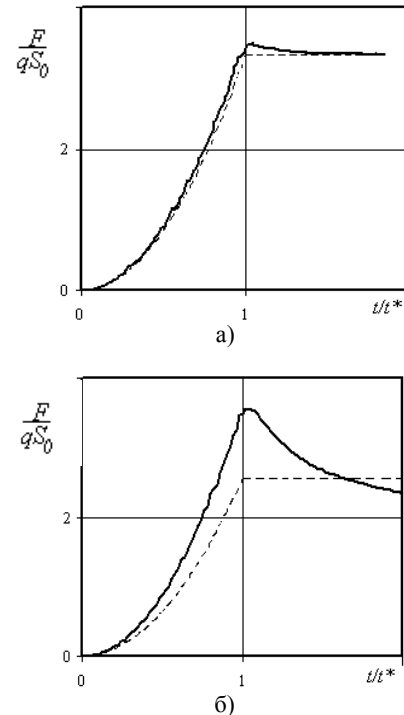


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления внедрению конических ударников с углами полураствора $\gamma=\pi/6$ (а) и $\gamma=\pi/3$ (б) с постоянной скоростью $u=200$ м/с от времени

денные ранее [14], были получены аппроксимацией нормального напряжения в диапазоне скоростей $u=100\text{--}800$ м/с и составили $\alpha=1.4$, $\beta=17.2$.

На рис. 3а, б показаны распределения безразмерной силы сопротивления внедрению от времени, отнесенные к величине $q_n S_0$, $q_n = \rho_0 u^2$ при внедрении жестких конических ударников с углами полураствора $\gamma = \pi/6$ и $\pi/3$ при скоростях внедрения $V_0 = u / \sin \gamma$, $u=200$ м/с, соответственно. Параметр $t^*=H/V_0$, H – высота ударника. Расчеты проводились с учетом трения Кулона при коэффициенте поверхностного трения $k_{mp} = 0.3$ [15].

Из рис. 3а видно, что МЛВ хорошо описывает силу сопротивления внедрению для конических ударников с углом полураствора $\gamma \leq \pi/6$, отличие максимального и квазистационарного значений силы не превосходит 5%. Для конических ударников с большим углом полураствора (рис. 3б) погрешность определения максимума силы сопротивления существенно больше и составляет 28%, при этом отмечается значительное отличие максимальных и квазистационарных значений. Ранее для конических ударников с различными углами полураствора было отмечено, что в качестве критерия применимости модели для определения силы сопротивления внедрению можно использовать близость отно-

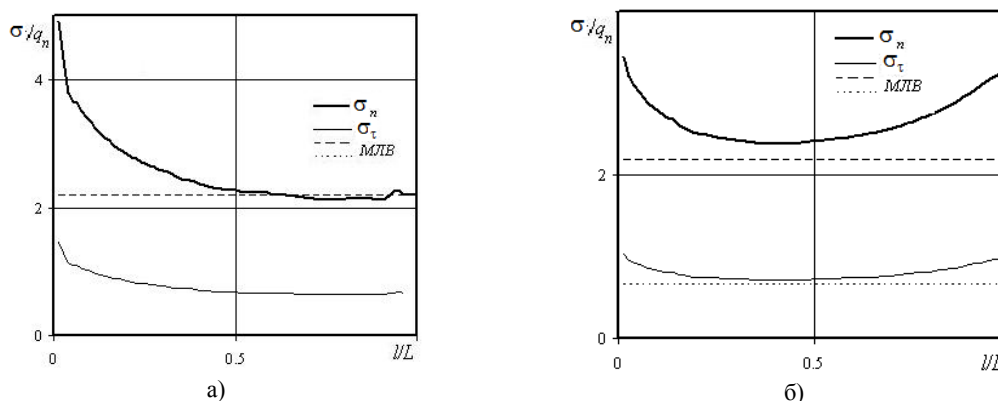


Рис. 4. Распределения напряжений вдоль конической образующей ударников с углами полураствора $\gamma=\pi/6$ (а) и $\gamma=\pi/3$ (б) при внедрении с постоянной скоростью $u=200$ м/с

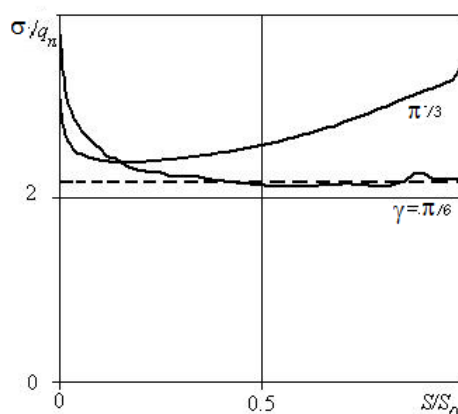


Рис. 5. Зависимость напряжений от площади проникания ударников с углами полураствора $\gamma=\pi/6$ и $\gamma=\pi/3$ при внедрении с постоянной скоростью $u=200$ м/с

нения максимального значения силы сопротивления и силы на квазистационарной стадии внедрения к единице [16, 17].

На рис. 4а, б представлены распределения безразмерного нормального напряжения вдоль образующей, отнесенные, соответственно, к величинам q_n и L , где L – длина образующей ударника. Сплошными линиями на графиках обозначены результаты численных расчетов, штриховыми линиями – данные, полученные в рамках МЛВ (6).

На рис. 4 наблюдается отличие данных МЛВ (6) от результатов численных расчетов при распределении нормальных напряжений вблизи носовой части ударника, однако эти отличия не влияют на величину силы сопротивления внедрению (рис. 3а) для конических ударников с малым углом раствора. Большее влияние на силу сопротивления оказывают напряжения, возникающие в окрестности миделя – максимальной площади поперечного сечения ударника при полном внедрении тела в грунтовую среду, что наблюдается для конических ударников с углом полураствора $\gamma=\pi/3$ (рис. 3б, 4б).

Графики зависимости безразмерного нормального напряжения, отнесенного к величине

q_n , от площади внедрения конического ударника, отнесенной к площади миделя, на рис. 5 демонстрируют сделанное замечание. Сплошными линиями обозначены результаты численных расчетов, штриховой – МЛВ.

В приведенных координатах площади под кривыми определяют вклады нормальных напряжений в результирующую максимальную силу сопротивления внедрению в грунт конических ударников с углами полураствора $\gamma=\pi/6$ и $\gamma=\pi/3$.

Касательные напряжения на поверхности движущегося в среде конуса [14] удовлетворительно описываются моделью трения Кулона для двух рассмотренных случаев.

Заключение

В осесимметричной постановке проведены численные расчеты процесса удара и проникания жесткого конического ударника в песчаный грунт с постоянной скоростью внедрения при фиксированном значении коэффициента внутреннего трения $k=1$ с различными углами полураствора. Показано, что МЛВ удовлетворительно качественно и количественно описывает си-

лу сопротивления внедрению и напряжение для конических ударников с малыми углами раствора и лишь в среднем описывает распределения для углов $\gamma > \pi/3$. Таким образом, определение параметров модели локального взаимодействия возможно на основе экспериментальных данных (зависимости силы сопротивления от скорости удара) по внедрению в грунт конических ударников с углом полураствора $\gamma < \pi/6$ в диапазоне изменения скоростей $u = 200\text{--}500$ м/с.

Автор выражает благодарность В.Л. Котову за постановку задачи и обсуждение результатов работы.

Работа рекомендована к публикации в журнале по итогам конкурса научных работ аспирантов на получение финансовой поддержки диссертационных исследований, выполняемых по приоритетному направлению развития ННГУ как Национального исследовательского университета.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1137, финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для ведущих научных школ (грант НШ-2843.2012.8) и РФФИ (12-08-33106-мол_а_вед, 10-08-00376-а).

Список литературы

1. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modeling of Plate Penetration Dynamics – A Review // *Applied Mechanics Reviews*. 2005. V. 58. P. 355–371.
2. Котов В.Л., Баландин Вл.В., Линник Е.Ю., Баландин Вл.Вл. О применимости модели локального взаимодействия для определения сил сопротивления внедрению сферы в нелинейно-сжимаемый грунт // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2012. Т. 5. № 4. С. 435–442.
3. Линник Е.Ю., Гоник Н.Г., Тарасова А.А., Котов В.Л. Решение задачи о расширении сферической полости в грунтовой среде в предположении несжимаемости за фронтом ударной волны // *Проблемы прочности и пластичности*: Межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2012. Вып. 74.
4. Баженов В.Г., Котов В.Л. Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М.: Физматлит, 2011. 208 с.
5. Forrestal M.J., Tzou D.Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets // *International Journal of Solids and Structures*. 1997. V. 34. P. 4127–4146.
6. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментально-теоретические исследования процессов проникания жестких ударников и идентификация свойств грунтовых сред // *ПМТФ*. 2009. Т. 50. № 6. С. 115–124.
7. Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В. и др. Исследование волновых процессов в грунтовой среде при взрыве накладного заряда // *Изв. РАН. МТТ*. 2001. № 2. С. 70–77.
8. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л., Кочетков А.В. Исследование удара и проникания тел вращения в мягкий грунт // *Прикладная математика и механика*. 2003. № 6. С. 686–697.
9. Баженов В.Г., Котов В.Л., Крылов С.В. и др. Экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой // *ПМТФ*. 2001. Т. 42. № 6. С. 190–198.
10. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л. и др. Анализ применимости модифицированного метода Кольского для динамических испытаний грунтовых сред в деформируемой обойме // *ПМТФ*. 2000. Т. 41. № 3. С. 155–162.
11. Баженов В.Г., Зефирин С.В., Кочетков А.В. и др. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // *Мат. моделирование*. 2000. Т. 12. № 6. С. 67–72.
12. Баженов В.Г., Козлов Е.А., Крылов С.В. Численное моделирование нелинейных двумерных задач ударного взаимодействия деформируемых сред и конструкций на основе метода С.К. Годунова // *ППШП. Исследование и оптимизация конструкций: Всеосоюз. межвуз. сб. Горький: Изд-во ГГУ. 1990. С. 99–106.*
13. Абузьяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л. и др. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред // *ЖВМ и МФ*. 2000. Т. 40. № 6. С. 940–953.
14. Котов В.Л., Линник Е.Ю., Тарасова А.А. Определение параметров квадратичной модели локального взаимодействия при внедрении сферического ударника в мягкий грунт // *Проблемы прочности и пластичности*: Межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2013. Вып. 75(1). С. 47–55.
15. Котов В.Л., Баландин В.В., Ломунов А.К. Оценка эффектов поверхностного трения при нестационарном контакте элементов конструкций с песчаным грунтом // *Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2010. Вып. 72. С. 137–141.
16. Котов В.Л. Исследование применимости автомодельного решения задачи о расширении сферической полости в сжимаемой среде для определения давления на поверхности контакта «ударник–грунт» // *Проблемы прочности и пластичности*: Межвуз. сб. / Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2008. Вып. 70. С. 123–131.
17. Котов В.Л., Баландин В.В., Брагов А.М. и др. Применение модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению ударников в песчаный грунт // *ПМТФ*. 2013. Т. 54. № 4. С. 114–125.

DETERMINING MODEL PARAMETERS OF LOCAL INTERACTION AT THE PENETRATION OF CONICAL-NOSE PROJECTILES INTO SANDY SOIL*E. Yu. Linnik*

The model parameters of local interaction are determined describing contact stresses at the projectile surface. A quadratic dependence was used between the local normal stress and the normal velocity of the projectile; the Coulomb model was used for tangent stresses. A comparison has been made between the previously obtained problem solution on spherical cavity expansion taking into account dynamic compression and the shear strength of the soil medium and the numerical calculations simulating the penetration of conical-nose projectiles into the sandy soil in the framework of the reversed experiment. Good agreement has been shown between the numerical calculation results and the local interaction model to determine the penetration resistance force in case of minor differences between the maximum and quasi-stationary values.

Keywords: quadratic model of local interaction, soil medium, Grigoryan soil model, shock adiabat, spherical cavity expansion, penetration resistance force, penetration, conical-nose projectile.

References

1. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modeling of Plate Penetration Dynamics – A Review // *Applied Mechanics Reviews*. 2005. V. 58. P. 355–371.
2. Kotov V.L., Balandin V.I., Linnik E.Ju., Balandin V.I. O primenimosti modeli lokal'nogo vzaimodejstvija dlja opredelenija sil soprotivlenija vnedreniju sfery v nelinejno-szhimaemyj grunt // *Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred*. 2012. T. 5. № 4. S. 435–442.
3. Linnik E.Ju., Gonik N.G., Tarasova A.A., Kotov V.L. Reshenie zadachi o rasshirenii sfericheskoj polosti v gruntovoj srede v predpolozhenii neshhimaemosti za frontom udarnoj volny // *Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhdvuz. sb. N. Novgorod: Izd-vo NNGU*. 2012. Vyp. 74.
4. Bazhenov V.G., Kotov V.L. Matematicheskoe modelirovanie nestacionarnyh processov udara i pronikaniya osesimmetrichnyh tel i identifikacija svojstv gruntovyh sred. M.: Fiz-matlit, 2011. 208 s.
5. Forrestal M.J., Tzou D.Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets // *International Journal of Solids and Structures*. 1997. V. 34. P. 4127–4146.
6. Bazhenov V.G., Kotov V.L., Krylov S.V. i dr. Jeksperimental'no-teoreticheskij analiz nestacionarnyh processov vzaimodejstvija deformiruemyh udarnikov s gruntovoj sredoj // *PMTF*. 2001. T. 42. № 6. S. 190–198.
7. Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L. i dr. Analiz primenimosti modifitsirovannogo metoda Kol'skogo dlja dinamicheskikh ispytaniy gruntovyh sred v deformiruemoj obojme // *PMTF*. 2000. T. 41. № 3. S. 155–162.
8. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kochetkov A.V. i dr. Paket programm «Dinamika-2» dlja reshenija ploskih i osesimmetrichnyh nelinejnyh zadach nestacionarnogo vzaimodejstvija konstrukcij so szhimaemymi sredami // *Mat. modelirovanie*. 2000. T. 12. № 6. S. 67–72.
9. Bazhenov V.G., Kozlov E.A., Krylov S.V. Chislennoe modelirovanie nelinejnyh dvumernyh zadach udarnogo vzaimodejstvija deformiruemyh sred i konstrukcij na osnove metoda S.K. Godunova // *PPPP. Issledovanie i optimizacija konstrukcij: Vsesojuz. mezhdvuz. sb. Gor'kij: Izd-vo GGU*. 1990. S. 99–106.
10. Abuzjarov M.H., Bazhenov V.G., Kotov V.L. i dr. Metod raspada razryvov v dinamike uprugoplas-ticheskijh sred // *ZhVM i MF*. 2000. T. 40. № 6. S. 940–953.
11. Kotov V.L., Linnik E.Ju., Tarasova A.A. Opredelenie parametrov kvadrachnoy modeli lokal'nogo vzaimodejstvija pri vnedrenii sfericheskogo udarnika v mjagkij grunt // *Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhdvuz. sb. N. Novgorod: Izd-vo NNGU*. 2013. Vyp. 75(1). S. 47–55.
12. Kotov V.L., Balandin V.V., Lomunov A.K. Ocenka jeffektov poverhnostnogo trenija pri nestacionarnom kontakte jelementov konstrukcij s peschanym gruntom // *Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhdvuzovskij sbornik. N. Novgorod: Izd-vo NNGU*. 2010. Vyp. 72. C. 137–141.
13. Kotov V.L. Issledovanie primenimosti avtomodel'nogo reshenija zadachi o rasshirenii sfericheskoj polosti v szhimaemoj srede dlja opredelenija davlenija na poverhnosti kontakta «udarnik–grunt» // *Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhdvuz. sb. N. Novgorod: Izd-vo NNGU*. 2008. Vyp. 70. S. 123–131.
14. Kotov V.L., Balandin V.V., Bragov A.M. i dr. Primenenie modeli lokal'nogo vzaimodejstvija dlja opredelenija sily soprotivlenija vnedreniju udarnikov v peschanyj grunt // *PMTF*. 2013. T. 54. № 4. S. 114–125.