

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА И ПРОНИКАНИЯ В МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ, ПОКРЫТЫЙ СНЕГОМ*

© 2014 г.

**Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков
С.В. Крылов, Е.Ю. Повереннов**

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

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 03.07.2014

Приводятся результаты численного решения задачи о нормальном ударе и проникании цилиндрического тела с конической головной частью в мерзлый грунт, покрытый слоем снега. Мерзлый грунт моделируется сжимаемой средой С.С. Григоряна с необратимыми объемными и сдвиговыми деформациями, а снег – идеальной пластически сжимаемой средой с нелинейными уравнениями состояния, различными для процессов активного нагружения и разгрузки. Верификация уравнений состояния снега в диапазоне давлений от десятков до нескольких сотен МПа производится путем сравнения решения одномерной задачи об ударном нагружении массива снега с известными экспериментальными данными. При заданных параметрах отмечается незначительное влияние снежного покрова на перегрузку, скорость движения и глубину проникания ударника в грунт.

Ключевые слова: удар, проникание, мерзлый грунт, снег, численное моделирование.

Введение

Изучение процессов поведения массивов снега и мерзлого грунта под действием динамических нагрузок является актуальным с точки зрения развития транспортной инфраструктуры в зимние периоды, оценки критических параметров лавинообразования, проведения строительных работ, взаимодействия снега и мерзлого грунта с различными преградами и элементами конструкций. В настоящее время известно небольшое количество работ, содержащих результаты экспериментальных исследований по динамическому нагружению снега и мерзлого грунта [1–4]. Также мало работ, посвященных численному моделированию ударно-волнового нагружения указанных сред [5–8]. Из анализа имеющихся экспериментально-теоретических исследований поведения пористых мерзлых грунтов при динамическом нагру-

*Выполнено при частичном финансировании грантом Минобрнауки (соглашение от 27 августа 2013 г. №02.В.21.0013 между Минобрнауки и ННГУ), РФФИ (проекты №14-08-31149 мол_а; №13-08-97091 р_поволжье_а; №13-08-00219 а; 14-08-00197 а), Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8), базовой частью государственного задания Минобрнауки (проект №2014/134 2226).

жении [9, 10] следует, что они имеют более высокие пороговые значения структурной прочности, чем немерзлые грунты, существенную зависимость свойств от начальной температуры и влажности. Результаты экспериментов показывают, что и снег, и мерзлые грунты проявляют нелинейные свойства, различные для стадий нагружения и разгрузки. В настоящей статье исследуются процессы удара и проникания цилиндрического тела в слоистую (снег и мерзлый грунт) среду на основе упругопластической модели С.С. Григоряна [6, 11] с использованием аппроксимации зависимости давления от плотности [12] для мерзлого грунта и уравнения состояния в форме Рэнкина–Гюгоню [8] для снега.

1. Постановка задачи и метод решения

Постановка задачи показана на рис. 1. В силу осевой симметрии рассматривается область $r \geq 0$, где r – радиальная компонента цилиндрической системы координат $r\theta z$. Изучается ударное взаимодействие цилиндрического тела с конической головной частью с мерзлым грунтом, покрытым сверху массивом снега толщиной z_p . Длина цилиндрической части тела обозначена L , радиус R , угол полураствора конуса α , начальная скорость V_0 . Цифрами 1 и 2 обозначены слои снега и мерзлого грунта соответственно.

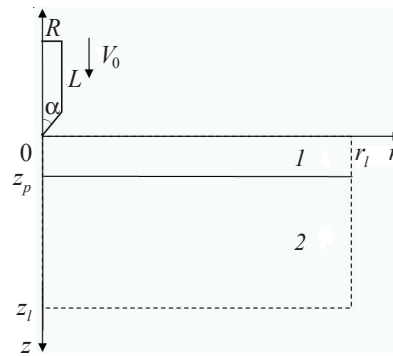


Рис. 1

Для описания процессов динамического деформирования грунтовой среды используются уравнения механики сплошных сред в цилиндрической системе координат в виде [13]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{f} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{g} = \mathbf{h}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ s_{rr} \\ s_{zz} \\ s_{rz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - s_{rr} \\ \rho v u - s_{rz} \\ u \left(s_{rr} - \frac{4}{3} G \right) \\ u \left(s_{zz} + \frac{2}{3} G \right) \\ u s_{rz} - G v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho u v - s_{rz} \\ \rho v^2 + p - s_{zz} \\ v \left(s_{rr} + \frac{2}{3} G \right) \\ v \left(s_{zz} - \frac{4}{3} G \right) \\ v s_{rz} - G u \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho u}{r} \\ \frac{1}{r}(2s_{rr} + s_{zz} - \rho u^2) \\ \frac{1}{r}(s_{rz} - \rho v u) \\ s_{rr}\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) + s_{rz}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r}\right) - \lambda s_{rr} - \frac{2Gu}{3r} \\ s_{zz}\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) + s_{rz}\left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}\right) - \lambda s_{zz} - \frac{2Gu}{3r} \\ -s_{rr}\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r}\right) + s_{zz}\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r}\right) + s_{rz}\left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\partial v}{\partial z}\right) - \lambda s_{rz} \end{bmatrix}.$$

Здесь p – давление; ρ – плотность; u, v – компоненты скорости по r и z ; s_{rr}, s_{rz}, s_{zz} – компоненты девиатора тензора напряжений; G – модуль сдвига. Первые три уравнения системы (1) представляют собой законы сохранения массы и импульса. Следующие три уравнения – физические соотношения динамики упругопластической среды с учетом поворота тензора напряжений в эйлеровых координатах (производная Яуманна), записанные в дифференциальной форме. При упругом деформировании параметр $\lambda = 0$. В качестве критерия перехода частицы среды из упругого в пластическое состояние при сдвиговом деформировании используется условие текучести Мизеса.

Грунты, как пористые среды, наряду с необратимыми сдвиговыми деформациями проявляют способность к необратимым объемным деформациям. Для описания необратимого объемного деформирования грунта, связанного с ликвидацией свободной пористости, вводится дополнительная функция $\rho^*(r, z, t)$, характеризующая максимальную плотность, достигнутую частицами грунта при нагружении. Уравнение состояния (УРС) подобных сред имеет вид [11]:

$$p = \begin{cases} f_n(\rho), & dp/dt > 0, \\ f_p(\rho, \rho^*), & dp/dt \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

При нагружении среды $\rho^* = \rho$, при разгрузке среды полагаем $d\rho^*/dt = 0$. Если это уравнение, справедливое при разгрузке-догрузке, умножить на ρ , а уравнение неразрывности из (1) умножить на ρ^* и их сложить, то получится уравнение в форме, аналогичной законам сохранения (1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\rho^*) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho\rho^*u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\rho^*v) = -\frac{\rho\rho^*u}{r}. \quad (3)$$

Система уравнений (1) для процессов разгрузки-догрузки дополняется уравнением (3). Интегральная форма системы (1), на базе которой строится разностная схема, имеет вид:

$$\oint_{\omega} \mathbf{u} dr dz + \mathbf{f} dz dt + \mathbf{g} dr dt = \iiint_{\Omega} \mathbf{h} dr dz dt. \quad (4)$$

Здесь Ω – произвольный замкнутый объем с поверхностью ω .

Кривые объемного сжатия (2) содержат упругий, упругопластический и гидродинамический участки.

Давление p и плотность ρ в диапазоне изменения давления $-p_e \leq p \leq p_e$ (упругий участок) связаны линейной зависимостью вида:

$$p - p_0 = C_e^2(\rho - \rho_0), \quad (5)$$

где $C_e^2 = (p_e - p_0)/(\rho_e - \rho_0)$ – квадрат скорости звука в грунте при упругих возмущениях, p_0 и ρ_0 – начальные давление и плотность в грунте, p_e – предельное значение давления на упругом участке деформирования среды, характеризующее структурную прочность.

В упругопластической области деформирования $p_e \leq p \leq p_{\text{lim}}$ используется аппроксимация [6, 12]:

$$\rho/\rho_0 = \varepsilon_e + \left(\sum_{i=1}^4 \alpha_i [1 + \gamma_i (p - p_e)/E_i]^{-1/\gamma_i} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – объемные концентрации свободной пористости (защемленного воздуха), жидкости (воды), твердого компонента и льда соответственно; E_i – модули объемного сжатия компонентов; γ_i – заданные константы; ρ_0, p_0 – начальные значения плотности и давления; $\varepsilon_e = 1 - \rho_0/\rho_e$.

Разгрузка от достигнутой в процессе нагружения грунта максимальной плотности ρ^* происходит по нелинейной траектории, которая описывается двухзвенной линией, состоящей из двух линейных участков [6]. На гидродинамическом участке деформирования ($p > p_{\text{lim}}$) кривая разгрузки совпадает с кривой нагрузки.

Кривые предельного состояния для сдвигового деформирования описываются зависимостью:

$$\sigma_T(p) = \begin{cases} Y(p) = Y_0 + \mu p, & p_e < p < p_{pl}, \\ Y_{pl}, & p \geq p_{pl}. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $\sigma_T(p)$ – предел текучести; Y_0, μ – заданные константы; p_{pl}, Y_{pl} – параметры предельной структурной прочности на сдвиг.

Для описания упругого поведения материала ударника используется система уравнений (4), а уравнением состояния для шаровых компонент тензора напряжений служит линейная зависимость $p = K\varepsilon$, где K – модуль объемного сжатия, $\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho$ – объемная деформация.

В уравнении состояния для снега используется аппроксимация ударной адиабаты в форме Рэнкина – Гюгонио $p = \rho_0 c_0^2 \varepsilon / (1 - s\varepsilon)^2$, которая предполагает линейную зависимость скорости ударной волны D от скорости частиц среды: $D = c_0 + su$ (c_0 и s – константы материала, определяемые из экспериментов). При проведении расчетов предполагалось, что разгрузка снежной среды от достигнутой в процессе нагружения максимальной плотности происходит по линейной траектории, при этом наклон к оси p прямой разгрузки соответствует скорости звука в воде (1500 м/с). Сдвиговым деформированием снега пренебрегается, так как в рассматриваемых далее задачах диапазон действующих нагрузок (от десятков до 400 МПа) таков, что преобладающую роль играет объемное уплотнение снежного массива.

Система уравнений (4)–(7), описывающая процессы нестационарного ударного взаимодействия рассматриваемых объектов, дополняется начальными, контакт-

ными и граничными условиями. На свободной поверхности снега нормальная и касательная компоненты напряжения принимают соответственно значения: $\sigma_{nn} = -p_0$ ($p_0 = 0,1$ МПа), $\sigma_{nt} = 0$. На оси симметрии $r = 0$ выполняются условия симметрии $u = 0$, $\sigma_{rz} = 0$. На контактных границах реализуются условия непроникания со скольжением, трением и возможным взаимным отрывом. Между снегом и мерзлым грунтом, снегом и ударником коэффициент трения равен нулю, между ударником и мерзлым грунтом его значение 0,3, как в работе [6]. В начальный момент времени $t = 0$ скорости и деформации в грунте и снеге отсутствуют.

Численное решение строится на основе метода С.К. Годунова. К достоинствам метода можно отнести комбинированный подход к описанию движения среды, основанный на использовании подвижной эйлерово-лагранжевой разностной сетки. При этом линии сетки, аппроксимирующие физические границы, перемещаются со скоростями частиц, а внутренние линии – с произвольно заданными скоростями. Тем самым устраняются большие искажения расчетных ячеек. Кроме того, конечно-разностная схема Годунова обладает такими важными свойствами, как монотонность и консервативность. Конечно-разностные соотношения для системы (4) описаны в [13] и реализованы в ППП «Динамика-2» [14].

Внешние границы расчетной области r_l и z_l выбраны с учетом того, чтобы возмущения от них не исказили решение в рассматриваемой области вблизи тела в заданный интервал времени. Характерный размер сторон топологически четырехугольных ячеек разностной сетки, покрывающей расчетные области ударника, слоев снега и грунта, составил 0,005 м.

2. Анализ результатов численных исследований

В расчетах удара и проникания по нормали ударника с конической головной частью использовался мерзлый грунт со следующими значениями параметров уравнения состояния, соответствующими мерзлому неводонасыщенному суглинку [12]: $t_{тр} = -11$ °С, $\alpha_1 = 0,154$, $\alpha_2 = 0,146$, $\alpha_3 = 0,575$, $\alpha_4 = 0,125$, $E_1 = 28$ МПа, $E_2 = 0,225 \cdot 10^4$ МПа, $E_3 = 6,625 \cdot 10^4$ МПа, $E_4 = 1,395 \cdot 10^4$ МПа, $\gamma_1 = 0,01$, $\gamma_2 = 7$, $\gamma_3 = 5$, $\gamma_4 = 5$, $\rho_0 = 1,8$ г/см³, $p_e = 5,7$ МПа, $\rho_e = 1,801$ г/см³, $\rho_{lim} = 2,3$ г/см³, $\gamma_c = 2,1$, $\gamma_p = 8$, $K_e = 8870$ МПа, $C_e = 2220$ м/с, $G = 3200$ МПа, $Y_0 = 0,62$ МПа, $\mu = 0,33$, $P_{pl} = 150$ МПа, $Y_{pl} = 50,48$ МПа.

Достоверность применяемой модели мерзлого грунта подтверждена в [6] соответствием численных решений (глубин проникания) эмпирическим соотношениям, полученным на основе обобщения экспериментов [1] по прониканию ударников разной формы, где автором приводятся зависимости глубины проникания от начальной скорости ударника.

Для верификации модели снега проводилось сопоставление численного решения одномерной задачи об ударном нагружении полубесконечной снежной среды с результатами эксперимента, описанного в [3]. Указанный эксперимент по ударному нагружению снега с целью получения одноосного деформированного состояния проводился с помощью газовой пушки калибра 0,2 м. Плоская пластина из плексигласа ускорялась сжатым азотом и ударялась по мишени со снегом. Мишень представляла собой медный цилиндр, герметично закрытый по торцам алюминиевыми пластинами, внутри которого находился снег плотностью 0,4 г/см³. В результате эксперимента замерялись временные зависимости напряжения в датчиках, расположенных вдоль линии действия ударной нагрузки на расстояниях 0; 0,013; 0,027;

0,037 м от места соударения. Авторами работ [2, 3] было показано, что результаты численного моделирования, полученные ими в одномерной и двумерной постановках при помощи программного кода PRONTO2D, отличались не более чем на 10%, что лежало в пределах разброса опытных данных. Влияния границ цилиндрической камеры на решения в течение рассмотренного промежутка времени отмечено не было. В связи с этим задача об ударном нагружении массива снега плотностью $0,4 \text{ г/см}^3$ рассматривалась в одномерной постановке (рис. 2) с параметрами уравнения состояния снега, указанными в [8]: $c_0 = 53,9 \text{ м/с}$, $s = 1,86$. Цифрами на рис. 2 схематично изображены точки, где анализировались временные зависимости напряжения, соответствующие геометрическому расположению датчиков в эксперименте.

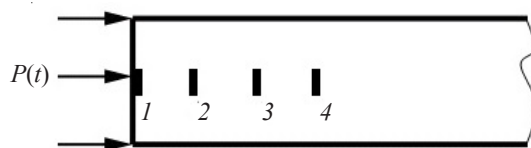


Рис. 2

В качестве ударной нагрузки на границе полубесконечной области задавалась временная зависимость давления, измеренная в эксперименте датчиком 1, расположенным в месте соударения (рис. 3).

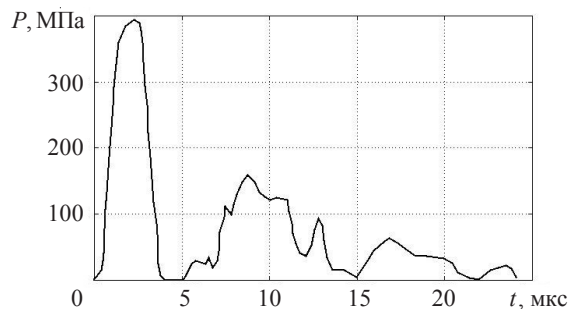


Рис. 3

На рис. 4 приведены графики временных зависимостей давления, полученные по результатам расчетов (сплошные линии) и экспериментов (маркеры), соответствующие показаниям датчиков 2–4, указанных на рис. 2.

Достаточно хорошее соответствие опытных и численных результатов свидетельствует об адекватности используемой модели динамического поведения снега и возможности ее применения для решения прикладных задач.

Далее приводится численное решение задачи о проникании ударника в мерзлый грунт, покрытый слоем снега толщиной $z_p = 0,3 \text{ м}$, с начальной скоростью 200 м/с . Материал упругого ударника – сталь, размеры: $R = 0,04 \text{ м}$, $L = 0,13 \text{ м}$, $\alpha = 30^\circ$; механические характеристики: плотность $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$, $K = 1,67 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $G = 7,69 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, масса $6,011 \text{ кг}$.

Начальная стадия проникания цилиндрикоконического ударника, как и для однородного мерзлого грунта, имеет ярко выраженный нестационарный характер, затем движение ударника переходит в квазистационарную стадию обтекания с развитой каверной. На рис. 5 штриховой и сплошной линиями соответственно показаны из-

менения во времени скорости V (м/с) и перегрузки A (в долях ускорения свободного падения) ударника при начальной скорости соударения $V_0 = 200$ м/с.

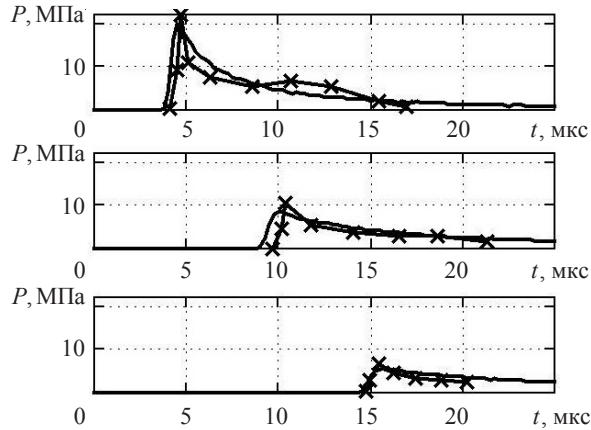


Рис. 4

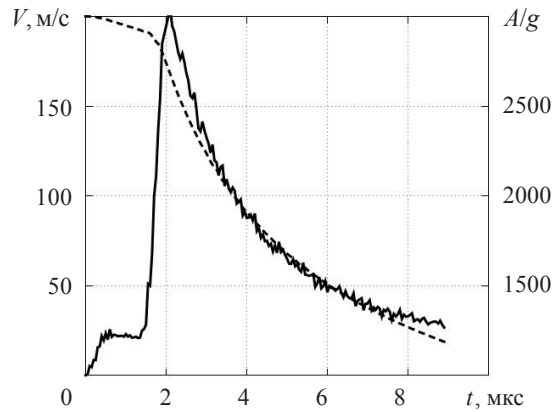


Рис. 5

Из полученных результатов видно, что слой снега толщиной 0,3 м оказывает незначительное (порядка 7%) влияние на падение скорости ударника. Максимальное значение перегрузки при проникании в мерзлый грунт почти на порядок превышает максимальное значение при проникании в слой снега. Глубина проникания в мерзлый грунт отличается незначительно от варианта проникания без слоя снега [6].

Заключение

Решена двумерная нелинейная осесимметричная задача об ударе и проникании цилиндриконического упругого тела в мерзлый грунт, покрытый слоем снега. Проведена верификация используемых параметров уравнения состояния снега с помощью известных экспериментальных данных. Используемые численная методика и уравнение состояния позволяют получать теоретические оценки параметров процессов удара и проникания тел в мерзлый грунт, покрытый снежным слоем. При заданных параметрах системы влияние снежного покрова является незначительным, что соответствует известным опытным данным [4], полученным при рассмотрении проникания конического тела в пластилин, также покрытый слоем снега.

Более заметное влияние снежного покрова на параметры проникания можно получить при меньших скоростях тел V_0 и большей толщине слоя снега.

Список литературы

1. Young C.W. Penetration equations. Contractor report. SAND97-2426. Applied Research Associates. Inc. 1997.
2. Shock response of snow / J.B. Johnson, D.J. Solie, J.B. Brown, E.S. Gaffney // J. of Applied Physics. 1993. №73 (10). P. 4852–4861.
3. Shock response of snow. Analysis of experimental methods and constitutive model development / J.B. Johnson, J.A. Brown, E.S. Gaffney, G.L. Blaisdell, D.J. Solie // USA CRREL Rep. 1992. P. 91–12.
4. Экспериментальное исследование проникания недеформируемого ударника в глинистую среду и снег / Ю.Н. Бухарев, В.П. Гандурин, А.Е. Кораблев, В.А. Морозов, М.И. Хаймович // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 1991. Вып. 48. С. 99–106.
5. Моделирование импульсных процессов в мягких и мерзлых грунтовых средах / В.В. Баландин, А.М. Брагов, Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, Е.Ю. Повереннов // Приволжский науч. журнал. 2009. №3. С. 7–15.
6. Численное моделирование осесимметричных процессов удара и проникания тел в мерзлый грунт / Е.Г. Глазова, С.В. Зефирова, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, М.Ю. Орлов, Е.Ю. Повереннов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2013. Вып. 75 (3). С. 199–205.
7. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2007. 572 с.
8. Miller D.A., Tichota R.G., Adams E.E. An explicit numerical model for the study of snow's response to explosive air blast // Cold Regions Science and Technology. 2011. №69 (2–3). P. 156–164.
9. Труханов Ю.Я. Экспериментальное исследование полей напряжений и скоростей частиц при взрыве в мерзлом грунте // Физика горения и взрыва. 1967. №1. С. 128–136.
10. Вовк А.А., Михалюк А.В., Черный Г.И. и др. Механические свойства мерзлых грунтов при динамическом нагружении // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1980. №2. С. 14–17.
11. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. 1960. Т. 24. Вып. 6. С. 1057.
12. Ляхов Г.М. Модель мерзлых грунтов для описания волновых процессов // Проблемы термомеханики грунтов / Москов. ун-т, 1986. С. 16–36.
13. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред / М.Х. Абузяров, В.Г. Баженов, В.Л. Котов, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.Р. Фельдгун // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40, №6. С. 940–953.
14. Программный комплекс «Динамика-2» / В.Г. Баженов, С.В. Зефирова, В.Р. Фельдгун, А.В. Кочетков, С.В. Крылов // Трансферные технологии в информатике: Науч.-технич. сб. / Томск. политехнич. ин-т, 1999. Вып.1. С. 40–45.

NUMERICALLY MODELING OF IMPACT AND PENETRATION INTO FROZEN SOIL COVERED WITH SNOW

E.G. Glazova, A.V. Kochetkov, S.V. Krylov, E.Yu. Poverennov

In this paper the results of numerically modelling normal impact and penetration of a cylindrical-conical body into frozen soil covered with snow are presented. The frozen snow modeled using a perfect plastic compressible medium with nonlinear equations of state different for loading and unloading. The snow thickness cover's influence on parameters of penetration is analyzed. The numerical results are compared with the available experimental data for applied equations of state verification.

Keywords: impact, penetration, frozen soil, snow, numerically modeling.