

УДК 539.3:624.131

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОБРАЩЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА К ИССЛЕДОВАНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВНЕДРЕНИЮ КОНИЧЕСКОГО УДАРНИКА В ЗАМОРОЖЕННЫЙ ПЕСОК*

© 2017 г. Котов В.Л.¹, Баландин Вл.В.¹, Линник Е.Ю.¹,
Баландин Вл.В.¹, Константинов А.Ю.^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

²Государственный научно-исследовательский институт машиностроения
им. В.В. Бахирева, Дзержинск, Российская Федерация

balandin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 25.04.2017

Проводится численный анализ применимости методики обращенного эксперимента к определению силы сопротивления внедрению конического ударника в мерзлый песчаный грунт при температуре -18°C . Состояние образца грунта до замораживания характеризуется практически полным водонасыщением. Поведение грунта при деформировании описывается в рамках модели сжимаемой упругопластической среды с условием пластичности, зависящим от давления. Динамическая диаграмма сжимаемости мерзлого грунта содержит начальный линейно-упругий участок. Скорость удара и проникания варьируется в ходе расчетов от 150 до 300 м/с, диаметр основания конуса 10, 12 и 20 мм. Геометрия расчетной области определяется размерами контейнера, используемого в обращенном эксперименте. Деформирование контейнера в расчетах не учитывается, действие стенок контейнера моделируется двумя вариантами задания граничных условий: свободная поверхность (отсутствие стенок) и условие непроницаемости по нормали и свободное проскальзывание в касательном направлении. Численные расчеты процесса проникания конического ударника по нормали к свободной поверхности осуществляются в осесимметричной постановке с применением пакета программ «Динамика-2» и в трехмерной постановке в рамках программного продукта LS-DYNA.

Проведен анализ влияния волн, отраженных от стенок контейнера, на силу сопротивления внедрению ударника в мерзлый грунт. В качестве меры влияния выбрана разность максимальных значений силы сопротивления внедрению, полученных при численных расчетах с двумя вариантами краевых условий. Показано, что для конических ударников с диаметрами основания 10 и 12 мм ошибка определения силы сопротивления внедрению вследствие отражений волн от стенок контейнера уменьшается с ростом скорости и при

* Выполнено при поддержке РФФИ (гранты №16-08-00825, 15-08-07977, 16-38-00102-мол_а).

скоростях более 150 м/с не превышает 10%. Для ударника с диаметром основания 20 мм ошибка 15% достигается при скоростях свыше 300 м/с.

Ключевые слова: обращенный эксперимент, конический ударник, замороженный песок, динамическая диаграмма сжимаемости.

Введение

Определение параметров закономерностей динамического деформирования мерзлых грунтов имеет важное научное и прикладное значение [1]. В середине XX века проводились полевые эксперименты [2, 3], в ходе которых определялись поля напряжений и скоростей при взрыве сферических зарядов взрывчатого вещества в мерзлом грунте. Установлена существенная зависимость параметров волн от температуры и характеристик грунта в исходном немерзлом состоянии: влажность, пористость, фракционный и компонентный состав и другие. Экспериментальное исследование поведения сред при варьировании этих параметров и температуры проводилось в лабораторных условиях с привлечением представлений механики сплошных сред при обработке результатов.

Поведение мерзлого грунта при давлениях, не превышающих 20 МПа, и скоростях деформаций до 10^{-2} с⁻¹ достаточно подробно изучено в экспериментах на одноосное и трехосное сжатие [4–7]. Более высокие скорости деформаций порядка 10^2 – 10^3 с⁻¹ реализованы в экспериментах с применением системы разрезных стержней Гопкинсона [8, 9], в которых получены диаграммы деформирования мерзлого песка при температуре до -28 °С. Данные экспериментов используются для оснащения математических моделей упругопластического поведения грунта с различными аппроксимациями поверхностей текучести и разрушения [5–9]. Более сложные модели явно учитывают зависимость от температуры [10] или влияние не полностью замерзшей воды [3, 11]. Упругие свойства мерзлого песка, характеризующиеся скоростями распространения волн сжатия и сдвига, определялись в работах [12–14]. Получено, что в водонасыщенном мерзлом грунте при температуре менее -10 °С скорость продольной волны может составлять 3–4 км/с.

Отмеченные особенности предъявляют повышенные требования к подготовке ударных экспериментов с мерзлым грунтом. Следуя работам [15–18], для более глубокого анализа процессов, происходящих при соударении твердых тел с грунтом, и выбора условий проведения обращенных экспериментов [19] в настоящей статье применяются численные методы расчета влияния геометрических размеров контейнеров на интегральные нагрузки на начальной нестационарной стадии внедрения в мерзлый грунт конических ударников различных диаметров.

1. Математическая постановка задачи удара и проникания

Математическая модель динамики грунтовой среды Григоряна [20] записывается в цилиндрической системе координат rOz (Oz – ось симметрии) 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 – Шлейхера:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho(u_{r,r} + u_{z,z}) = -\frac{\rho u_r}{r},$$

$$\begin{aligned}
\frac{\rho du_r}{dt} - \sigma_{rr,r} - \sigma_{rz,z} &= \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r}, \\
\frac{\rho du_z}{dt} - \sigma_{rz,r} - \sigma_{zz,z} &= \frac{\sigma_{rz}}{r}, \\
\frac{d\rho_*}{dt} &= \frac{d\rho}{dt} H(\rho - \rho_*) H\left(\frac{d\rho}{dt}\right), \\
D_j s_{ij} + \lambda s_{ij} &= 2G e_{ij} \quad (i, j = r, z), \\
s_{ij} s^{ij} &\leq \frac{2}{3} \sigma_T^2,
\end{aligned} \tag{1}$$

где t – время; ρ_0 , ρ и ρ_* – начальная, текущая и максимальная плотности, достигнутые в процессе нагружения; u_i , σ_{ij} , s_{ij} , e_{ij} – компоненты вектора скорости, тензора напряжений Коши и девиаторов тензоров напряжений и скоростей деформаций соответственно; H – функция Хевисайда; D_j – производная Яумана; d/dt – полная производная по времени; G – модуль сдвига; σ_T – предел текучести; по повторяющимся индексам производится суммирование. Параметр $\lambda = 0$ при упругом деформировании и $\lambda > 0$, если реализуется условие пластичности.

Замыкается система дифференциальных уравнений (1) конечными соотношениями, определяющими давление p и условие пластичности грунтовой среды:

$$\begin{aligned}
p &= f_1(\rho, \rho_*) H(\rho_* - \rho) H(\rho_0 - \rho), \\
\sigma_T &= f_2(p),
\end{aligned} \tag{2}$$

где f_1 – давление, f_2 – сопротивление среды сдвигу.

Система уравнений (1), (2) динамики грунтовой среды дополняется начальными и краевыми условиями. На головной части конического ударника, контактирующей с грунтовой средой, используется контактный алгоритм непроницаемости по нормали со скольжением по касательной с сухим трением в соответствии с моделью трения Кулона с постоянным коэффициентом трения k_f . На свободных поверхностях грунта и ударника нормальные и касательные напряжения задавались равными нулю. Внешние границы расчетной области грунта соответствовали геометрическим размерам контейнера, используемого в обращенном эксперименте. Деформирование контейнера не учитывалось, действие стенок контейнера моделировалось двумя вариантами задания краевых условий: условие непроницаемости по нормали и свободное проскальзывание в касательном направлении (краевое условие 1); условие свободной поверхности, соответствующее отсутствию стенок (краевое условие 2). В начальный момент времени напряжения и скорость частиц грунта равнялись нулю. Ударник считался жестким,двигающимся с постоянной скоростью, равной скорости удара.

Конкретизируем функции f_1 и f_2 в модели грунтовой среды Григоряна (1), (2). Динамическая сжимаемость грунта, как и ряда других сжимаемых материалов, описывается ударной адиабатой, которая может быть представлена в виде линейной зависимости скорости ударной волны D от массовой скорости u :

$$D = A + Bu. \tag{3}$$

Константа A близка к скорости распространения плоской волны сжатия в грунте при малых давлениях, B характеризует предельную сжимаемость грунта. Из удар-

ной адиабаты, представленной в виде линейной зависимости (3) и условий Гюгонио на ударной волне $\sigma = \rho_0 Du$, $\theta = u/D$, следует известная связь напряжения σ (полагаем положительным при сжатии) и объемной деформации θ :

$$\sigma(\theta) = \frac{\rho_0 A^2 \theta}{(1 - B\theta)^2}, \quad \theta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}. \quad (4)$$

Сопротивление среды сдвигу определяется дробно-рациональной зависимостью предела текучести от давления

$$f_2(p) = \sigma_0 + \frac{kp}{1 + kp / \Delta\sigma}, \quad \Delta\sigma = \sigma_M - \sigma_0. \quad (5)$$

Коэффициенты σ_0 , σ_M и k характеризуют сцепление, предельное значение предела текучести и внутреннее трение грунта.

Для давления принимается зависимость

$$p(\theta) = f_1(\theta) = \begin{cases} K\theta, & -\theta_e < \theta < \theta_e, \\ K\theta_e + \frac{\rho_0 a^2 \theta}{(1 - b\theta)^2}, & \theta \geq \theta_e. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь K , a и b – постоянные коэффициенты, величина θ_e ограничивает упругое поведение грунта. Методика определения коэффициентов a и b на основе известных параметров зависимостей (3)–(5) приводится в [21].

Разгрузка среды от состояния, характеризуемого значениями давления и плотности p_* и ρ_* , принимается линейной

$$p - p_* = \frac{K}{\rho_0} (\rho - \rho_*).$$

2. Постановка задачи численного моделирования

Численная реализация соотношений (1), (2) осуществлялась в рамках методики [22], основанной на модифицированной схеме Годунова и реализованной в пакете прикладных программ «Динамика-2», разработанном в НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского [23]. Проведенные ранее расчеты процессов удара и проникания осесимметричных ударников в мягкие грунтовые среды [24] показали хорошее соответствие численных и экспериментальных результатов. Моделирование волновых процессов в водонасыщенном и мерзлом грунте ранее проводилось также в [16] и [18].

Для повышения достоверности результатов численных расчетов задача о проникании конического ударника в упругопластическую среду, моделирующую мерзлый грунт, решалась в полной трехмерной постановке с использованием коммерческого программного продукта LS-DYNA. Ударник моделировался недеформируемым жестким телом (*MAT_RIGID), грунт – упругопластической средой, поведение которой описывается в рамках модели *MAT_SOIL_AND_FOAM [25].

Решение проводилось в постановке FSI (Fluid Structure Interaction), при которой уравнения движения ударника интегрировались в лагранжевой системе координат, а уравнения для грунта решались на эйлеровой сетке. Взаимодействие ударника и упругопластической среды осуществлялось с использованием специального типа контакта (CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID). Постановка и решение задачи проникания соответствует приведенной ранее в [25] постановке.

Параметры модели грунта (5), (6): $\rho_0 = 2100 \text{ кг/м}^3$, $p_e = 6 \text{ МПа}$, $K = 21000 \text{ МПа}$, $G = 7875 \text{ МПа}$ (определен при значении коэффициента Пуассона $1/3$), $a = 1400 \text{ м/с}$, $b = 4$, $\sigma_0 = 15 \text{ МПа}$, $k = 0,5$, $\sigma_M = 50 \text{ МПа}$, $k_f = 0,2$.

Выбор значений параметров обусловлен следующими соображениями. До значений напряжений $\sigma^* = 15\text{--}21 \text{ МПа}$, соответствующих пределу прочности мерзлого грунта при сжатии [1, 9], грунт ведет себя аналогично линейно-упругой среде. В условиях одноосного напряженного состояния имеем $p_e = \sigma^*/3$, при давлении $p_e \ll \sigma_M$ справедливо $\sigma^* = \sigma_0 + kp_e$, откуда следует $\sigma_0 = (1 - k/3)\sigma^*$. Результаты динамических испытаний [7–9] показывают зависимость диаграмм деформирования мерзлого грунта также и от скорости деформаций, приводящую к увеличению предела прочности на сжатие приблизительно в 1,5 раза в диапазоне изменения скорости деформаций от 300 до 1000 с^{-1} . Отметим, что значения предела прочности мерзлого грунта, полученные как при статических, так и при динамических испытаниях, характеризуются достаточным разбросом. В настоящей статье принималось среднее значение $\sigma^* = 18 \text{ МПа}$ и зависимость от скорости деформаций в первом приближении не учитывалась. При давлениях около 200 МПа и температуре -18°C происходит фазовый переход лед–вода и поведение мерзлого грунта становится близким к поведению водонасыщенного грунта, параметры уравнения состояния для которого определены в [16]. Скорость продольной волны c , определяемая наклоном диаграммы деформирования (6) на начальном участке, равна $\sqrt{(K + 4G/3)/\rho_0} = 3,8 \text{ км/с}$, скорость сдвиговой волны $\sqrt{G/\rho_0} = 1,9 \text{ км/с}$ [1, 12–14]. При превышении предела прочности на сжатие скорость продольной волны падает до значений 1,5 км/с, что соответствует разрушению скелета мерзлого грунта.

Прямоугольное сечение цилиндрической области грунта разбивается разностной сеткой на квадратные ячейки с размером сторон d/n (n – число ячеек). Для анализа сходимости используемой модификации метода Годунова [22] проводилась серия численных расчетов на сгущающихся сетках. Изменение квазистационарного значения силы в зависимости от размера ячейки d/n оказалось близко к линейному закону с достоверностью не менее 0,95, отличие значений сил при $n = 200$ от прогнозируемого при $n = \infty$ составило 10–15%. На рис. 1 приводятся зависимости от времени силы сопротивления внедрению в мерзлый грунт конического ударника с углом при вершине 60° с диаметром основания $d = 20 \text{ мм}$ в жесткой обойме со скоростями 150 м/с (кривые 1, 2) и 300 м/с (кривые 3, 4).

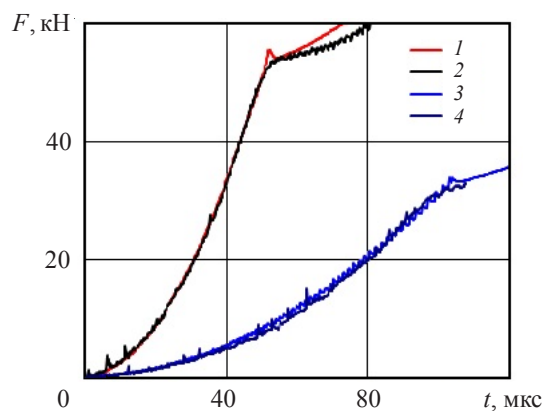


Рис. 1

Кривыми 1, 3 показаны результаты, полученные в расчетах с применением ППП «Динамика-2», номера кривых 2, 4 соответствуют результатам расчетов в рамках программного продукта LS-DYNA. Грунт занимал цилиндрическую область диаметром 54 мм и высотой 65 мм. Отметим практически полное совпадение кривых на стадии внедрения конической части ударника и хорошее соответствие результатов расчетов после отрыва потока.

3. Результаты численных расчетов

Рассмотрим результаты расчетов проникания конических ударников с углом при вершине 60° и диаметрами основания d , равными 10, 12 и 20 мм, при скоростях внедрения $V_0 = 150$ и 300 м/с для двух вариантов задания краевых условий, моделирующих абсолютно податливый и абсолютно жесткий контейнеры.

На рис. 2 приведены зависимости от времени силы сопротивления внедрению в мерзлый грунт конических ударников с диаметрами основания $d = 10$ мм (а), $d = 12$ мм (б) и $d = 20$ мм (в) со скоростями 150 м/с (кривые 1, 2) и 300 м/с (кривые 3, 4). Кривыми 1, 3 показаны результаты, полученные в расчетах с применением краевого условия 1, моделирующего действие жесткого контейнера, номера кривых 2, 4 соответствуют результатам расчетов без контейнера (краевое условие 2).

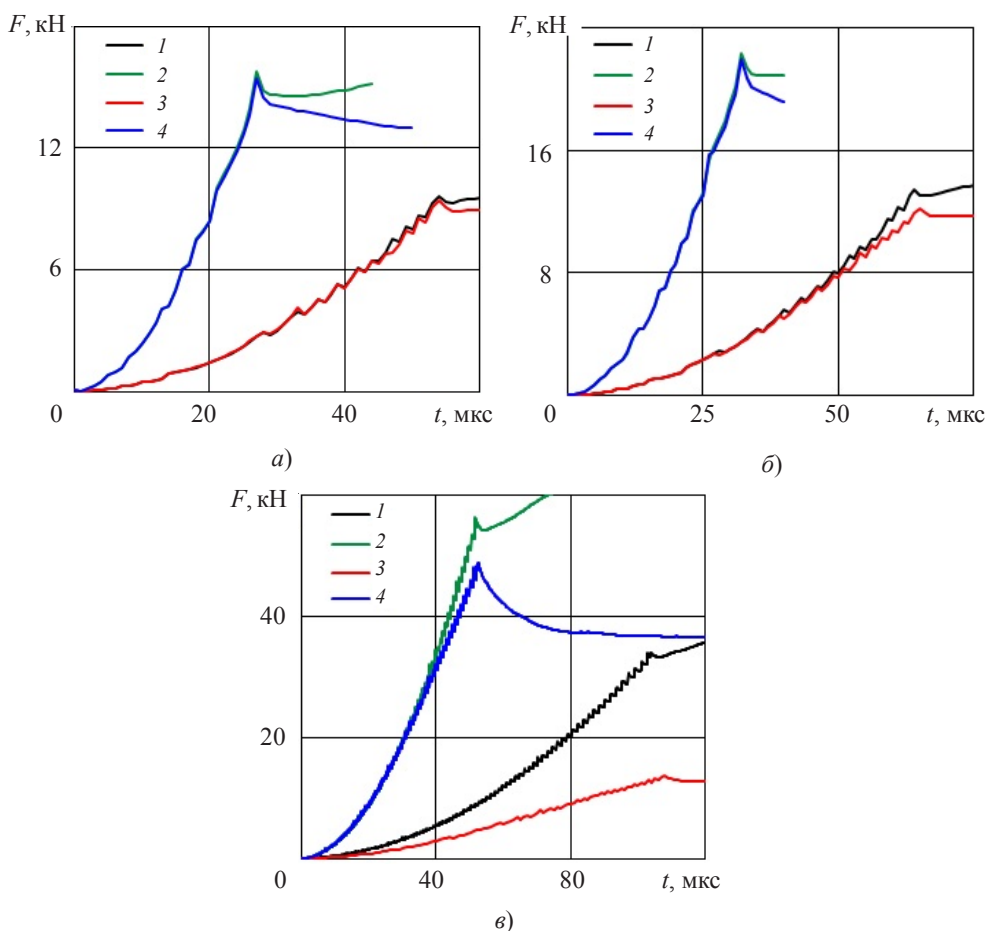


Рис. 2

После внедрения конической части ударника в песок ($t > t^* = \sqrt{3d/(2V_0)}$) рост площади контактной поверхности не происходит, и наблюдаемые изменения силы сопротивления внедрению связаны с действием (в соответствии с краевыми условиями) отраженных от границ области (стенок контейнера) волн сжатия-разрежения. Значение силы на момент времени t^* будем считать максимальным значением силы сопротивления внедрению.

Из рис. 2б видно, что влияние краевых условий на максимальное значение силы сопротивления внедрению ударника с диаметром основания $d = 12$ мм не превышает 10% при скорости внедрения 150 м/с и уменьшается с ростом скорости внедрения ударника в песок. Сила сопротивления внедрению ударника с диаметром основания $d = 10$ мм до момента $t = t^*$ практически не зависит от вида краевых условий. Существенное влияние краевые условия оказывают на силу сопротивления внедрению ударника с диаметром основания $d = 20$ мм: при изменении скорости внедрения со 150 до 300 м/с различие максимальных значений уменьшается с 60 до 15%.

Рассматривались также задачи проникания ударников в грунт при скорости внедрения 300 м/с, эквивалентные задачам проникания в полупространство в интервале времени $0 < t < 1,5t^*$. Результаты расчетов в виде зависимостей силы сопротивления внедрению от времени представлены на рис. 3. Номера кривых 1, 2 и 3 соответствуют результатам расчетов проникания в мерзлый грунт конусов с диаметрами основания d , равными 10, 12 и 20 мм. Наблюдается установление практически постоянного (квазистационарного) уровня силы сопротивления внедрению после достижения максимального значения. Заметим, что максимальное значение практически совпадает со значением, полученным в расчетах с применением краевого условия 1, моделирующего абсолютно жесткий контейнер (см. также рис. 2).

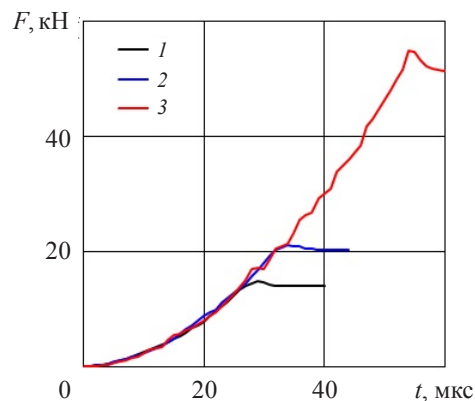


Рис. 3

Ранее проводились исследования влияния границ на определяемые в обращенных экспериментах максимальное и квазистационарное значения силы сопротивления внедрению полусферического ударника с диаметром основания $d = 20$ мм в сухой песок [15, 26]. Установлено, что при использовании в ходе численных расчетов граничного условия, моделирующего действие жесткого контейнера, квазистационарное значение силы сопротивления внедрению превышает аналогичное значение силы, полученное при расчете внедрения в полупространство, на 20% при скоростях удара более 100 м/с и далее уменьшается с ростом скорости удара. Расчеты процесса проникания в сухой грунт, проведенные при отсутствии контейнера,

показали уменьшение значений силы сопротивления. Качественно подобная картина наблюдается и при анализе процесса проникания в мерзлый грунт. Количественные отличия связаны с тем, что скорость продольной волны в мерзлом грунте (3000–4000 м/с) на порядок больше скорости распространения волн малой амплитуды в сухом песке, которая составляет 300–400 м/с.

На рис. 4 приводятся безразмерные зависимости силы сопротивления внедрению конуса с диаметром основания $d=20$ мм, полученные в обращенных экспериментах и численных расчетах. Значения силы сопротивления и времени отнесены, соответственно, к величинам $F^* = \rho_0 S_0 V_0^2 / 2$ и t^* .

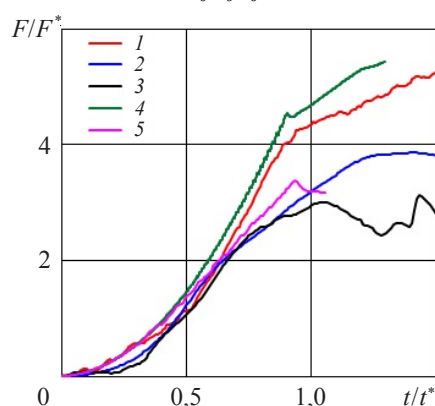


Рис. 4

Кривыми 1–3 показаны результаты экспериментов с использованием следующих материалов контейнера: сталь, сплав Д16Т и полипропилен; скорость внедрения V_0 составила 133, 135 и 150 м/с соответственно. Кривые 4 и 5 соответствуют результатам численных расчетов проникания конуса со скоростью 150 м/с при использовании краевых условий 1 и 2.

Из рис. 4 видно, что максимальное значение достигается при $t/t^* < 1$, что может быть связано с более быстрым ростом смоченной поверхности вследствие образования брызговой струи и подъемом свободной поверхности грунта навстречу ударнику при ударе. Отметим, что сила сопротивления прониканию ударника в мерзлый грунт, полученная в результате расчетов с применением краевого условия 1 (абсолютно жесткий контейнер), близка к результатам обращенного эксперимента с использованием стального контейнера. Влияние волн, отраженных от стенок контейнера из сплава Д16Т и полипропилена, близко к результатам моделирования при отсутствии контейнера. До момента времени $t/t^* = 0,5$ все результаты находятся близко друг к другу.

Заключение

Проведен анализ ошибки определения силы сопротивления внедрению конического ударника в мерзлый грунт в обращенном эксперименте вследствие влияния волн, отраженных от стенок контейнера. Показано, что для ударника с диаметром основания 20 мм ошибка 15% достигается при скоростях свыше 300 м/с и далее уменьшается с ростом скорости. Для конических ударников с диаметрами основания 10 и 12 мм при скоростях удара более 150 м/с влиянием стенок контейнера можно пренебречь.

Список литературы

1. Цытович Н.А. *Механика мерзлых грунтов*: Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
2. Труханов Ю.Я. Экспериментальное исследование полей напряжений и скоростей частиц при взрыве в мерзлом грунте. *Физика горения и взрыва*. 1967. №1. С. 128–136.
3. Ляхов Г.М., Фраш Г.Б. Взрывные волны в мерзлых грунтах. *ПМТФ*. 1983. №6. С. 52–57.
4. Shujuan Zhang, Yuanming Lai, Zhizhong Sun, Zhihua Gao. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement. *Cold Regions Science and Technology*. 2007. Vol. 47. P. 263–270.
5. Lai Yuanming, Jin Long, Chang Xiaoxiao. Yield criterion and elasto-plastic damage constitutive model for frozen sandy soil. *International Journal of Plasticity*. 2009. Vol. 25. P. 1177–1205.
6. Yugui Yang, Yuanming Lai, Jingbo Li. Laboratory investigation on the strength characteristic of frozen sand considering effect of confining pressure. *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Vol. 60. P. 245–250.
7. Haimin Du, Wei Ma, Shujuan Zhang, Zhiwei Zhou, Enlong Liu. Strength properties of ice-rich frozen silty sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture contents. *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 123. P. 107–113.
8. Квинг-Юонг Ма. Экспериментальный анализ динамических механических свойств искусственно замороженной почвы с помощью методики разрезного стержня Гопкинсона. *ПМТФ*. 2010. Т. 51. №3. С. 178–183.
9. Qijun Xie, Zhiwu Zhu, Guozheng Kang. Dynamic stress-strain behavior of frozen soil: Experiments and modeling. *Cold Regions Science and Technology*. 2014. Vol. 106–107. P. 153–160.
10. Yang R., Lemarchand E., Fen-Chong T., Azouni A. A micromechanics model for partial freezing in porous media. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol. 75–76. P. 109–121.
11. Zhiwu Zhu, Guozheng Kang, Yue Ma, Qijun Xie, Dan Zhang, Jianguo Ning. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading. *Mechanics of Materials*. 2016. Vol. 102. P. 108–116.
12. Christ M., Park J. Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*. 2009. Vol. 58. P. 136–142.
13. Jung-Hee Park, Jong-Sub Lee. Characteristics of elastic waves in sand-silt mixtures due to freezing. *Cold Regions Science and Technology*. 2014. Vol. 99. P. 1–11.
14. Ling X.Z., Zhang F., Li Q.L., An L.S., Wang J.H. Dynamic shear modulus and damping ratio of frozen compacted sand subjected to freeze-thaw cycle under multi-stage cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 76. P. 111–121.
15. Брагов А.М., Баландин В.В., Баландин В.В., Котов В.Л. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду. *ЖТФ*. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 62–70.
16. Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин В.В., Баландин В.В. Исследование динамического сопротивления сдвигу водонасыщенного песка по результатам обращенных экспериментов. *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. Вып. 17. С. 64–70.
17. Баландин В.В., Котов В.Л. Исследование распространения импульса напряжений в упругом цилиндрическом стержне. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 388–395.
18. Глазова Е.Г., Зефилов С.В., Кочетков А.В., Крылов С.В. Численное моделирование процессов нормального удара и проникания осесимметричного тела в мерзлый грунт. *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2015. №5. С. 48–56.
19. Баландин В.В., Брагов А.М. Экспериментальная методика измерения сил сопротивления при взаимодействии ударника с грунтовой средой. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения*. 1991. Вып. 47. С. 101–104.
20. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов. *ПММ*. 1960. Т. 24. №6. С. 1057–1072.

21. Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл., Линник Е.Ю. Применение модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению ударников в песчаный грунт. *ПМТФ*. 2013. Т. 54. № 4. С. 114–125.

22. Баженов В.Г., Котов В.Л. Модификация численной схемы Годунова применительно к решению задач импульсного нагружения мягких грунтов. *ПМТФ*. 2002. Т. 43. №4. С. 139–149.

23. Баженов В.Г., Зефиоров С.В., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами. *Математическое моделирование*. 2000. Т. 12. №6. С. 67–72.

24. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментально-теоретическое исследование процессов проникания жестких ударников и идентификация свойств грунтовых сред. *ПМТФ*. 2009. Т. 50. №6. С. 115–125.

25. Котов В.Л., Константинов А.Ю., Кибец Ю.И., Тарасова А.А., Власов В.П. Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в упругопластической среде. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 4. С. 303–311.

26. Баженов В.Г., Котов В.Л., Баландин В.В., Крылов С.В., Брагов А.М., Цветкова Е.В. Экспериментально-теоретический анализ нестационарных процессов взаимодействия деформируемых ударников с грунтовой средой. *ПМТФ*. 2001. Т. 42. №6. С. 190–198.

References

1. Tsytovich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of Frozen Soils]*. Moscow. Vysshaia shkola Publ. 1973. 448 p. (In Russian).

2. Trukhanov Yu. Ya. Eksperimentalnoe issledovanie poley napryazheniy i skorostey chastits pri vzyrye v merzлом grunte [Experimental study of the stresses and the velocities of the particles in the explosion in the frozen ground]. *Fizika goreniya i vzyrya [Combustion, Explosion, and Shock Waves]*. 1967. No 1. P. 128–136 (In Russian).

3. Lyakhov G.M., Frash G.B. Vzryvnye volny v merzlykh gruntakh [Blast waves in frozen soils]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 1982. No 6. P. 52–57 (In Russian).

4. Shujuan Zhang, Yuanming Lai, Zhizhong Sun, Zhihua Gao. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement. *Cold Regions Science and Technology*. 2007. Vol. 47. P. 263–270.

5. Lai Yuanming, Jin Long, Chang Xiaoxiao. Yield criterion and elasto-plastic damage constitutive model for frozen sandy soil. *International Journal of Plasticity*. 2009. Vol. 25. P. 1177–1205.

6. Yugui Yang, Yuanming Lai, Jingbo Li. Laboratory investigation on the strength characteristic of frozen sand considering effect of confining pressure. *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Vol. 60. P. 245–250.

7. Haimin Du, Wei Ma, Shujuan Zhang, Zhiwei Zhou, Enlong Liu. Strength properties of ice-rich frozen silty sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture contents. *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 123. P. 107–113.

8. Qin-Yong Ma. Eksperimentalnyy analiz dinamicheskikh mekhanicheskikh svoystv iskusstvenno zamorozhennoy pochvy s pomoshchyu metodiki razreznogo sterzhnya Gopkinsona [Experimental analysis of dynamic mechanical properties for artificially frozen clay by the split Hopkinson pressure bar]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2010. Vol. 51. No 3. P. 448–452 (In Russian).

9. Qijun Xie, Zhiwu Zhu, Guozheng Kang. Dynamic stress-strain behavior of frozen soil: Experiments and modeling. *Cold Regions Science and Technology*. 2014. Vol. 106–107. P. 153–160.

10. Yang R., Lemarchand E., Fen-Chong T., Azouni A. A micromechanics model for partial freezing in porous media. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol. 75–76. P. 109–121.

11. Zhiwu Zhu, Guozheng Kang, Yue Ma, Qijun Xie, Dan Zhang, Jianguo Ning. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading. *Mechanics of Materials*. 2016. Vol. 102. P. 108–116.
12. Christ M., Park J. Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*. 2009. Vol. 58. P. 136–142.
13. Jung-Hee Park, Jong-Sub Lee. Characteristics of elastic waves in sand-silt mixtures due to freezing. *Cold Regions Science and Technology*. 2014. Vol. 99. P. 1–11.
14. Ling X.Z., Zhang F., Li Q.L., An L.S., Wang J.H. Dynamic shear modulus and damping ratio of frozen compacted sand subjected to freeze-thaw cycle under multi-stage cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 76. P. 111–121.
15. Bragov A.M., Balandin V.V., Balandin V.V., Kotov V.L. Experimental study of the dynamics of penetration of a solid body into a soil medium. *Technical Physics*. 2016. Vol. 61. No 6. P. 860–868.
16. Kotov V.L., Bragov A.M., Balandin V.I., Balandin V.I. Issledovanie dinamicheskogo soprotivleniya sdvigu vodonasyshchennogo peska po rezul'tatam obrashchennykh eksperimentov [Study of the dynamic shear resistance of saturated sand according to the results of reversed experiments]. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics Letters]*. 2017. Vol. 43. Iss. 17. P. 64–70 (In Russian).
17. Balandin V.I., Kotov V.L. Issledovanie rasprostraneniya impulsa napryazheniy v uprugom tsilindricheskom sterzhne [Studying the propagation of a stress pulse in an elastic cylindrical bar]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 4. P. 388–395 (In Russian).
18. Glazova E.G., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V. Chislennoe modelirovanie protsessov normalnogo udara i pronikaniya osesimmetrichnogo tela v merzlyy grunt [Numerical modeling of normal impact and penetration of an axisymmetric body into frozen soil]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 2015. No 5. P. 48–56 (In Russian).
19. Balandin V.V., Bragov A.M. Eksperimentalnaya metodika izmereniya sil soprotivleniya pri vzaimodeystvii udarnika s gruntovoy sredoy [Experimental method of measurement of resistance forces in the interaction of the projectile with the ground environment]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Metody reshenia [Applied Problems of Strength and Plasticity. Solution Methods]*. 1991. Iss. 47. P. 101–104 (In Russian).
20. Grigorian S.S. Ob osnovnykh predstavleniyakh dinamiki gruntov [On basic concepts in soil dynamics]. *Prikladnaya matematika i mekhanika [Journal of Applied Mathematics and Mechanics]*. 1960. Vol. 24. No 6. P. 1057–1072 (In Russian).
21. Kotov V.L., Bragov A.M., Balandin V.I., Balandin V.I., Linnik E. Yu. Primenenie modeli lokalnogo vzaimodeystviya dlya opredeleniya sily soprotivleniya vnedreniyu udarnikov v peschanyy grunt [Using a local-interaction model to determine the resistance to penetration of projectiles into sandy soil]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2013. Vol. 54. No 4. P. 603–611 (In Russian).
22. Bazhenov V.G., Kotov V.L. Modifikatsiya chislennoy skhemy Godunova primenitelno k resheniyu zadach impulsnogo nagruzheniya myagkikh gruntov [Modification of Godunov's numerical scheme for solving problems of pulsed loading of soft soils]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2002. Vol. 43. No 4. P. 139–149 (In Russian).
23. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Feldgun V.R. Paket programm "Dinamika-2" dlya resheniya ploskikh i osesimmetrichnykh nelineynykh zadach nestatsionarnogo vzaimodeystviya konstruktsey so szhimaemymi sredami [The software package "Dinamika-2" to solve plane and axisymmetric nonlinear problems of non-stationary interaction of structures with compressible media]. *Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical Models and Computer Simulations]*. 2000. Vol. 12. No 6. P. 67–72 (In Russian).
24. Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie protsessov pronikaniya zhestkikh udarnikov i identifikatsiya svoystv gruntovykh sred [Experimental and theoretical study of the penetration of rigid projectiles and identification of soil properties]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2009. Vol. 50. No 6. P. 115–125 (In Russian).

25. Kotov V.L., Konstantinov A. Yu., Kibets Yu.I., Tarasova A.A., Vlasov V.P. Chislennoe modelirovanie ploskoparallelnogo dvizheniya konicheskikh udarnikov v uprugoplasticheskoy srede [Numerically modeling plane-parallel displacement of conical strikers in an elastoplastic medium]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2013. Vol. 75. No 4. P. 303–311 (In Russian).

26. Bazhenov V.G., Kotov V.L., Balandin V.V., Krylov S.V., Bragov A.M., Tsvetkova E.V. Eksperimentalno-teoreticheskiy analiz nestatsionarnykh protsessov vzaimodeystviya deformiruemykh udarnikov s gruntovoy sredoy [Experimental-theoretical analysis of nonstationary interaction of deformable impactors with soil]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2001. Vol. 42. No 6. P. 190–198 (In Russian).

USING THE INVERSE EXPERIMENT METHODOLOGY IN STUDYING RESISTANCE TO PENETRATION OF A CONICAL STRIKER INTO FROZEN SAND

**Kotov V.L.¹, Balandin V.V.¹, Linnik E.Yu.¹,
Balandin V.V.¹, Konstantinov A.Yu.^{1,2}**

¹*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Bakhirev State Research Institute of Engineering, Dzerzhinsk, Russian Federation*

The applicability of the inverse experiment methodology to evaluating the force resisting to penetration of a conical striker into frozen sandy soil at a temperature of -18 C is numerically analyzed. The state of the soil specimen prior to freezing is characterized as practically fully water-saturated. The behavior of the soil in the process of deformation is described in the framework of the model of a compressible elastoplastic medium, with the plasticity condition depending on pressure. The dynamic compressibility diagram of the frozen soil shows an initial linearly elastic part. The impact and penetration velocities varied in the calculations from 150 to 300 m/s, the diameter of the cone base being 10, 12 and 20 mm. The geometry of the analyzed region is determined by the dimensions of the container used in the inverse experiment. Deformation of the container is not taken into account in calculations; the effect of the container walls is modeled by assigning one of the two possible boundary conditions: a free surface (no walls) and a condition of impenetrability along the normal and free tangential slipping. The process of penetration of a conical striker normally to the free surface is numerically analyzed in an axisymmetric formulation, using “Dinamika-2” software package, and in a 3D formulation in the framework of LS-Dyna software product.

The effect of waves reflected from the container walls on resistance to penetration of a striker into a frozen soil has been analyzed. The difference of the maximal values of the penetration resisting force, obtained from numerical computations with the two possible boundary conditions, was taken as a measure of the effect. It is shown that, for a conical striker with the base diameter of 10 and 12 mm, the inaccuracy in evaluating the penetration resisting force due to waves reflected from the container walls decreases with increasing the velocity, and at velocities of over 150 m/s is within 10%. For a striker with the base diameter of 20 mm, at the velocities of over 300 m/s the inaccuracy amounts to 15%.

Keywords: inverse experiment, conical striker, frozen sand, dynamic compressibility diagram.