

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОНИКАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ТЕЛ ВО ВЛАЖНЫЙ ПЕСОК

В. В. Баландин, Вл. Вл. Баландин, А. М. Брагов,
С. В. Крылов, Е. В. Цветкова

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия
E-mails: balandin@mech.unn.ru, rustydogg2007@yandex.ru, bragov@mech.unn.ru, krylov@mech.unn.ru, aljonuschka@mail.ru

Приведены результаты серии лабораторных обращенных экспериментов по нормальному соударению сферических тел с преградами из влажного (влажность 10 %) и водонасыщенного (влажность 18–20 %) песка, помещенного в металлические цилиндрические контейнеры. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов на основе модифицированного разностного метода Годунова. Выполнен анализ изменения сил сопротивления прониканию на различных стадиях процесса ударного взаимодействия, изучено влияние влажности и гранулометрического состава песка на максимальные значения сил при различных скоростях соударения. Установлено, что для песка с влажностью, равной 20 %, максимальная сила сопротивления в 1,5–2 раза меньше, чем для сухого песка.

Ключевые слова: проникание, обращенный эксперимент, влажный песок, сила сопротивления, модель Григоряна, метод Годунова.

DOI: 10.15372/PMTF20150606

Как известно, пески с различными размерами частиц и влажностью обладают различными механическими свойствами. Согласно данным работы [1] с увеличением размеров частиц в диапазоне давлений $p \leq 100$ МПа сжимаемость песка возрастает, в то время как при $p > 100$ МПа она уменьшается. При увеличении размеров частиц с $0,16 \div 0,20$ мм до $0,63 \div 1,00$ мм сдвиговая прочность песка увеличивается на 12–15 % [2]. Влажность также может оказывать влияние на динамические свойства песка. Например, водонасыщенные грунты обладают существенно меньшими сжимаемостью и прочностью по сравнению с сухими грунтами [2, 3]. Указанные факторы оказывают влияние на характеристики проникания твердых тел и прежде всего на силу сопротивления внедрению.

Постановка задачи. Эксперименты, в которых изучались основные закономерности проникания ударника в песок с различной влажностью и с частицами различного размера, проводились на установке ПГ-57, реализующей метод мерного стержня в обращенном эксперименте [4]. В стволе пушки калибром 57 мм разгоняется контейнер с грунтовой средой, а соединенный с мерным стержнем оголовок остается неподвижным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-01096), Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-08-00197, 15-08-07977а) и в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 2014/134 2226).

© Баландин В. В., Баландин Вл. Вл., Брагов А. М., Крылов С. В., Цветкова Е. В., 2015

Контейнеры для грунта были выполнены из алюминиевого сплава марки Д16Т и представляли собой тонкостенный стакан (толщина стенки $1,3 \div 1,4$ мм) диаметром 56,8 мм с дном толщиной 2 мм. Высота засыпки песком составляла 65 мм. Метаемые контейнеры заполнялись сухим песком, который затем незначительно уплотнялся. Контейнеры взвешивались для определения плотности сухого песка, а затем заливались определенным количеством воды до достижения требуемой влажности. При влажности, превышающей 20 %, на поверхности песка образовывался слой воды, который затем удалялся. Контейнеры повторно взвешивались для определения плотности и влажности водонасыщенного песка. Средняя плотность водонасыщенной смеси составляла 2065 кг/м^3 , а песка с влажностью 10 % — 1920 кг/м^3 . При исследовании влияния влажности на силу сопротивления внедрению ударника использовался песок с плотностью в сухом состоянии $(1750 \pm 50) \text{ кг/м}^3$, имеющий частицы размером $0,1 \div 1,0$ мм, диапазон скоростей удара v составлял $50 \div 400$ м/с. Ударники в виде полусферы с диаметром основания, равным 20 мм, были изготовлены из высокопрочной стали с пределом текучести более 2000 МПа.

Для анализа волновых процессов, развивающихся в водонасыщенном песке при проникании ударника, проведены численные расчеты в постановке, соответствующей обращенному эксперименту. В качестве модели динамического поведения водонасыщенной песчаной среды выбрана модель Григоряна с уравнениями состояния, основанными на результатах проведенных ранее плосковолновых экспериментов и экспериментов с использованием модифицированного метода Кольского [3]. Применяемая разностная методика, основанная на модифицированной схеме Годунова, изложена в [5], а ее тестирование проведено в [4, 6]. Особенности данной модификации являются более высокий порядок аппроксимации и применение подхода Эйлера — Лагранжа при описании движения сред с использованием произвольных подвижных разностных сеток. При численном решении поставленной задачи на контактных границах задавались следующие условия. На свободной поверхности нормальная и касательная компоненты напряжений равны нулю. На поверхностях контакта контейнер — грунт и ударник — грунт ставились условия непроникания по нормали и свободного проскальзывания в направлении по касательной. При постановке начальных условий принималось, что ударник и мерный стержень находятся в ненапряженном состоянии, скорость движения контейнера с водонасыщенным песком задана. Заметим, что силы сопротивления вычислялись путем интегрирования избыточных контактных усилий вдоль поверхности контакта ударника с песком.

Результаты экспериментов и расчетов. На рис. 1 приведена зависимость силы сопротивления F от времени t при проникании полусферы в песок с различной влажностью. Начальные участки кривых характеризуются сильной нестационарностью. Для сухого песка максимальное значение силы сопротивления достигается в течение $25 \div 50$ мкс (с увеличением скорости удара время достижения максимума уменьшается). Следует отметить, что максимальное значение силы сопротивления имеет место при глубине проникания ударника, равной $5 \div 6$ мм, т. е. $0,5 \div 0,6$ радиуса ударника. Затем происходят отрыв потока от поверхности полусферы и образование вокруг ударника каверны. Для водонасыщенного песка время нарастания силы сопротивления до максимального значения меньше, чем для сухого песка. Максимальное значение силы сопротивления достигается при погружении полусферического оголовка в водонасыщенный песок на глубину, равную $0,3 \div 0,4$ его радиуса. Быстрое увеличение силы сопротивления, по-видимому, обусловлено меньшей сжимаемостью водонасыщенного песка. Время уменьшения нагрузки также значительно меньше, чем при внедрении ударника в сухой песок, что в свою очередь вызвано большей скоростью разгрузки во влажном песке [3]. При уменьшении силы сопротивления от максимального значения до квазистационарного значения для водонасыщенного песка наблюдаются ее колебания с периодом $15 \div 20$ мкс. Возможно, это обусловлено наличием волновых процессов, происходящих в ударнике.

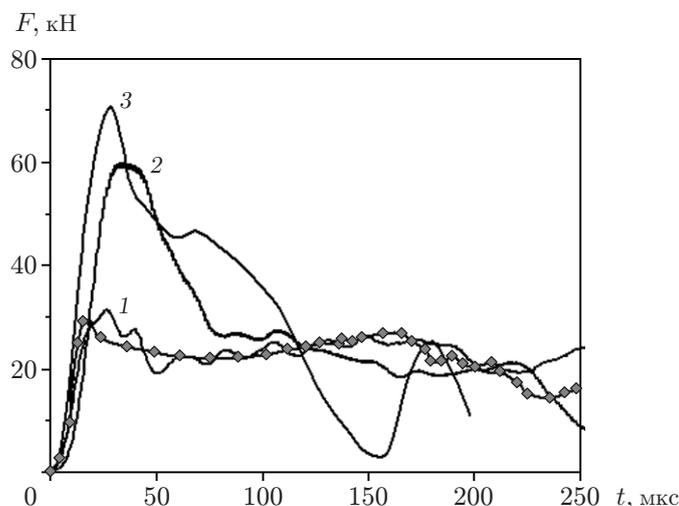


Рис. 1. Зависимость силы сопротивления от времени при проникании полусферы в песок с различной влажностью:

линии 1–3 — экспериментальные данные (1 — водонасыщенный песок с влажностью 20 %, 2 — влажный песок с влажностью 10 %, 3 — сухой песок); точки — результаты расчета для водонасыщенного песка с влажностью 20 %; кривые 1, 2 и точки — $v = 250$ м/с; кривая 3 — $v = 267$ м/с

Приведенные выше выводы подтверждаются результатами численных расчетов. На рис. 2 показаны расчетная область задачи и волновая картина при проникании ударника в водонасыщенный песок со скоростью $v = 250$ м/с. Сгущение изолиний давления вблизи головной части тела обусловлено его высоким градиентом, а максимальная степень черноты линий соответствует максимальному значению давления. Видно, что в момент времени $t = 70$ мкс головная волна сжатия отражается от боковой стенки контейнера и начинает взаимодействовать с волной разрежения, отраженной от свободной поверхности. Это приводит к незначительному увеличению силы сопротивления на квазистационарном этапе ударного взаимодействия (см. рис. 1). Тем не менее максимальное значение силы сопротивления было достигнуто до рассматриваемого момента времени при отсутствии влияния на нее отраженных от боковых стенок волновых возмущений. Отражение головной волны сжатия от дна контейнера происходит при $t > 140$ мкс (см. рис. 2). Затем сила сопротивления растет вплоть до момента высыпания песка из деформирующегося контейнера.

На рис. 3 приведена зависимость максимальной силы сопротивления от начальной скорости удара для полусферы при различных значениях влажности песка. Видно, что в исследованном диапазоне скоростей удара для песка с влажностью 10 % и сухого песка максимальные значения силы сопротивления внедрению практически равны, для водонасыщенного песка (влажность 20 %) максимальная сила сопротивления в 1,5–2 раза меньше, чем для сухого песка. Из рис. 3 следует, что расчетные и экспериментальные значения удовлетворительно согласуются.

Для того чтобы оценить влияние гранулометрического состава на характеристики процесса проникания ударника в водонасыщенный песок, проведены дополнительные эксперименты с песком влажностью $18 \div 20$ %, частицы которого имеют размеры $0,200 \div 0,315$ мм. Скорость соударения изменялась в диапазоне $v = 80 \div 430$ м/с. Результаты измерения сил сопротивления внедрению полусферы в данную среду приведены на рис. 4. Видно, что максимальная сила сопротивления внедрению полусферы в водонасыщенный песок практически не зависит от его гранулометрического состава.

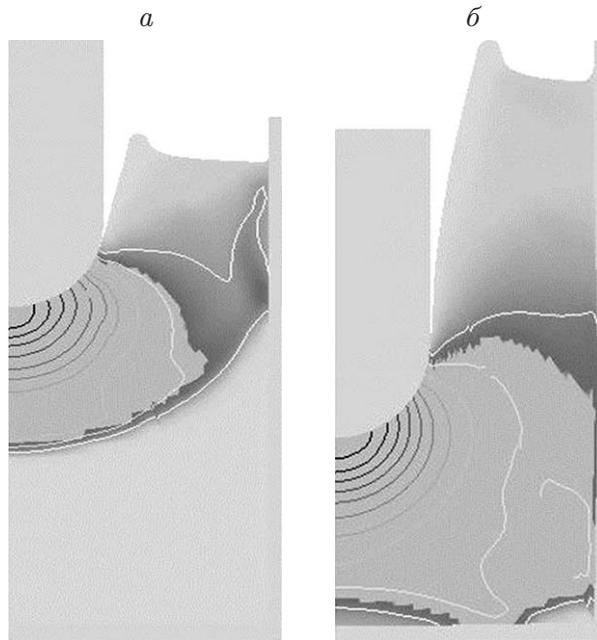


Рис. 2. Расчетная область задачи и волновая картина при проникании ударника в водонасыщенный песок ($v = 250$ м/с):
 а — $t = 70$ мкс, б — $t = 146$ мкс

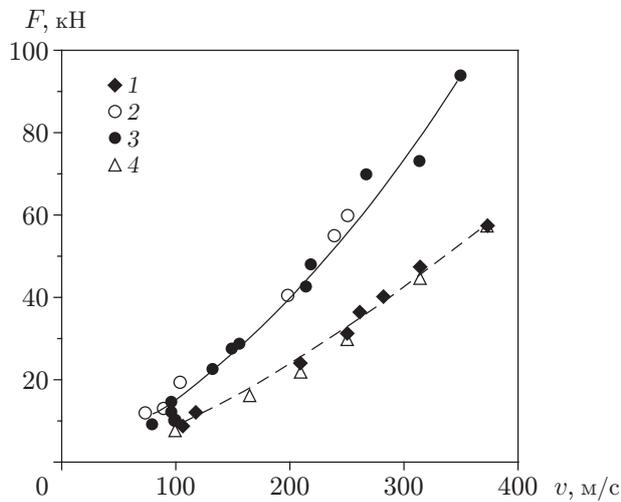


Рис. 3

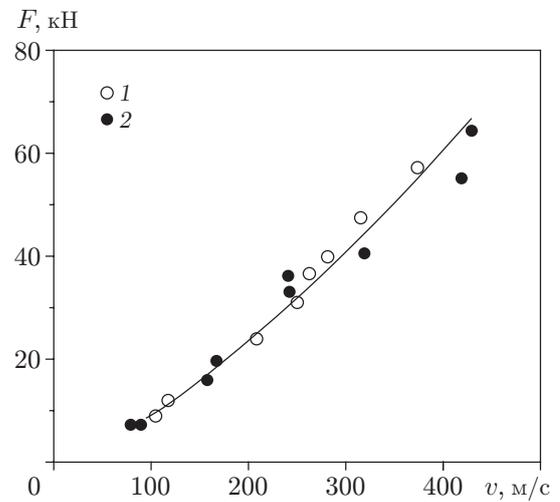


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость максимальной силы сопротивления от скорости удара для полусферы при различных значениях влажности песка:

точки 1–3 — экспериментальные данные (1 — водонасыщенный песок с влажностью 20 %, 2 — влажный песок с влажностью 10 %, 3 — сухой песок); точки 4 — результаты расчетов для водонасыщенного песка с влажностью 20 %; линии — квадратичные аппроксимации экспериментальных данных (сплошная — сухой песок и песок с влажностью 10 %, штриховая — водонасыщенный песок с влажностью 20 %)

Рис. 4. Зависимость силы сопротивления внедрению полусферы в водонасыщенный песок с частицами различного размера d от скорости удара:

1 — $d = 0,1 \div 1,0$ мм, 2 — $d = 0,200 \div 0,315$ мм; линия — квадратичная аппроксимация экспериментальных данных

Выводы. С использованием методики мерного стержня в обращенном эксперименте определены силы сопротивления прониканию сферических ударников в сухой, влажный и водонасыщенный песок. Проведено численное моделирование процессов соударения сферических ударников с водонасыщенным песком. Установлено, что результаты численных расчетов и экспериментальные данные, полученные с использованием известных экспериментальных диаграмм деформирования, удовлетворительно согласуются. При выбранных размерах контейнера практически отсутствует влияние волновых возмущений на величину силы сопротивления на нестационарной и начальной квазистационарных стадиях ударного взаимодействия. Установлено, что для сухого песка и песка с влажностью 10 % максимальные значения силы сопротивления практически равны, а для водонасыщенного песка с влажностью 20 % оно в 1,5–2 раза меньше. Проведенное исследование влияния гранулометрического состава песка на силу сопротивления внедрению полусферы для водонасыщенного песка показало, что рассмотренные размеры частиц песчаной мишени слабо влияют на силу сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брагов А. М., Гандурин В. П., Грушевский Г. М. и др. Методические особенности изучения динамической сжимаемости мягких грунтов в диапазоне давлений 0,05 ÷ 1,5 ГПа // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 2/3. С. 126–135.
2. Брагов А. М., Грушевский Г. М. Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 12. С. 70–72.
3. Bragov A. M., Demenko P. V., Kruszka L., et al. Investigation of dynamic compressibility and shear resistance of soft soils in a wide range of strain rate and pressure // Numerical methods in geotechnical engineering. P.: IENPC: LCPC, 2002. P. 909–917.
4. 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.
5. Абузяров М. Х., Баженов В. Г., Котов В. Л. и др. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2000. Т. 40, № 6. С. 940–953.
6. Абузяров М. Х., Крылов С. В., Цветкова Е. В. Моделирование гидроупругопластического взаимодействия с помощью программного комплекса UPSGOD // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Н. Новгород: Нижегород. ун-т, 2013. Вып. 75. С. 25–32.

Поступила в редакцию 8/VI 2015 г.
