

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА КОЛЬСКОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯГКИХ ГРУНТОВ *

А. М. Брагов, В. П. Гандурин, Г. М. Грушевский, А. К. Ломунов

*НИИ механики при Нижегородском государственном университете,
603600 Нижний Новгород*

Одним из наиболее обоснованных и распространенных методов динамических испытаний материалов при скоростях деформации 10^3 с^{-1} является метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [1]. Основная область применения этого метода относится к динамическим испытаниям металлов и их сплавов [2], реже он используется для определения механических свойств полимерных и композиционных материалов [3, 4]. Имеются лишь отдельные работы, в которых метод РСГ применяется для динамических испытаний горных пород [5] и бетонов [6].

В последние годы авторами было предложено использовать метод Кольского для получения динамических диаграмм деформирования мягких грунтов [7, 8]. Однако, наряду с диаграммами деформирования грунтов, очевидный интерес представляет такая механическая характеристика грунта, как сопротивление сдвигу. Установление зависимости этой характеристики от скорости деформации и давления имеет важное значение для формулировки уравнений состояния грунтовых сред. В настоящей работе дается описание модифицированного метода РСГ применительно к определению объемной сжимаемости и сопротивления сдвигу грунтовых материалов при скоростях деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Экспериментальная установка. На рис. 1 представлена установка, реализующая метод Кольского, которая используется в НИИ механики Нижегородского университета для динамических испытаний конструкционных материалов и грунтовых сред. Основными частями установки являются: газовая пушка 1, разрезной стержень Гопкинсона 3-5 и комплекс регистрирующей аппаратуры с персональной ЭВМ 15 для автоматизированной обработки результатов эксперимента.

Основное отличие предлагаемого варианта испытания мягких грунтов от известной схемы РСГ при испытаниях на сжатие состоит в том, что образец 4 грунта размещается в стальной обойме 10, которая препятствует его радиальной деформации. Такая схема испытаний в работе [6] получила название системы с пассивным ограничением радиальной деформации. Ограничивающая обойма длиной 15 мм и толщиной стенки 10 мм изготовлена из стали с пределом текучести 1000 МПа и с легким трением надевается на торцы мерных стержней (зазор между боковой поверхностью мерных стержней и внутренней поверхностью обоймы составляет 50 мкм). Окружная деформация обоймы измеряется с помощью четырех тензодатчиков, соединенных последовательно и наклеенных по окружности в среднем сечении обоймы.

Импульсы нагрузки в мерных стержнях создаются с помощью ударников 2 длиной от 50 до 500 мм, разгоняемых с помощью сжатого воздуха в

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-05-16572).

стволе малогабаритной газовой пушки калибром 20 мм [9]. Использование такого нагружающего устройства позволяет легко варьировать параметры нагрузки. В экспериментах с грунтами скорости деформации варьируются от $5 \cdot 10^2$ до $3 \cdot 10^3$ с⁻¹, а величины напряжений в образце могут достигать ~ 300 МПа.

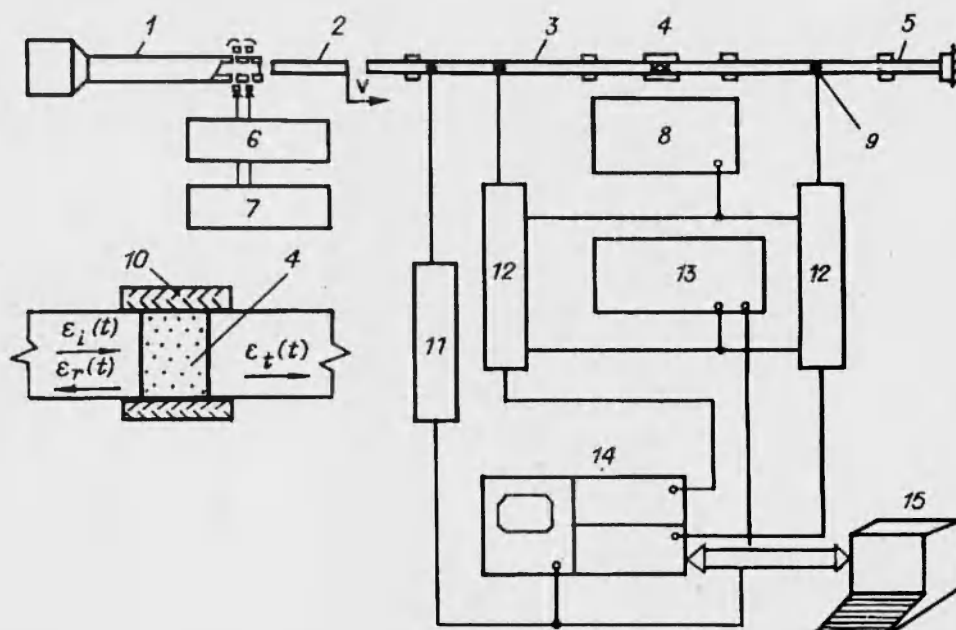


Рис. 1

Для измерения скорости ударника на дульном срезе ствола размещены два точечных источника света. В качестве приемников света используются быстродействующие фотодиоды. Сигналы с них через триггерные ячейки 6 подаются на частотомер 7, включенный в режим измерения интервала времени. Зная базу измерителя и время пролета ударником этой базы, легко вычислить скорость удара.

Собственно разрезной стержень Гопкинсона состоит из двух стержней 3 и 5 диаметром 20 мм и длиной по 1 м каждый с образцом-таблеткой 4 между ними. Стержни изготавливаются из высокопрочной стали либо из алюминиевого сплава Д16Т. Измерение упругих импульсов деформаций в стержнях осуществляется малогабаритными фольговыми тензорезисторами 9, наклеенными в середине мерных стержней, причем для исключения регистрации изгибных колебаний и увеличения амплитуды сигналов в каждом сечении наклеено по четыре последовательно соединенных тензорезистора. Поскольку в процессе испытаний регистрируется только переменная составляющая деформации в стержнях, для питания тензорезисторов выбрана потенциометрическая схема. Обе группы тензорезисторов питаются постоянным током от одного стандартного стабилизированного блока питания 8 через оригинальные схемы питания и калибровки 12.

Для определения масштабных коэффициентов перевода координат точек на осциллограмме в величины деформации и времени используется электрическая калибровка. Для этого с выхода одного из каналов двухканального генератора прямоугольных колебаний 13 подаются импульсы на малогабаритные герконовые реле, которые своими контактами подключают в цепи измерительных тензорезисторов масштабные сопротивления известной величины. Импульсы со второго канала генератора служат для синхронизации регистрирующего осциллографа. Контроль точности

калибровки осуществляется путем сравнения амплитуды нагружающего импульса с интенсивностью возбужденной волны, рассчитанной по одномерной теории упругих волн, на основании известной скорости ударника.

Регистрация импульсов деформаций со стержней производится с помощью цифрового запоминающего осциллографа С9-8 14. Для синхронизации запуска осциллографа используется размещенный вблизи ударяемого торца мерного стержня пьезокристалл, сигнал с которого через усилитель 11 подается на осциллограф. Информация, записанная в память осциллографа, через интерфейс КОП передается в ПЭВМ 15 типа IBM PC/AT для последующей обработки. Аналогично (с помощью второго осциллографа и схемы питания) производится регистрация импульса окружающей деформации обоймы. Сигнал с него также передается в ПЭВМ для обработки.

Основные зависимости метода. Рассмотрим процесс деформирования грунтового образца, размещенного в стальной обойме и нагружаемого в системе РСГ (рис. 2). В процессе испытаний мягких грунтовых материалов с использованием ограничивающей обоймы в экспериментах с РСГ напряжения в грунте обычно не превышают 300 МПа, поскольку существует значительное различие в импедансах мерных стержней и образца. В серии испытаний, результаты которых представлены в данной работе, напряжения достигали 170 МПа. Следует отметить, что эта величина существенно ниже предела текучести материала, из которого изготовлена обойма.

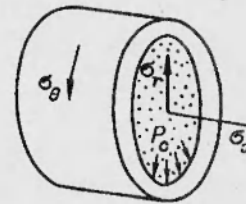


Рис. 2

Окружная деформация обоймы, измеренная в экспериментах с помощью тензодатчиков, не превышала 0,05 %, радиальные деформации обоймы имеют величины того же порядка, так как обойма деформируется упруго. В то же время продольные деформации образца достигают 10 % и более [7, 8]. В этих условиях радиальной деформацией грунтового образца можно пренебречь.

Таким образом, деформированное состояние образца можно считать одномерным, а напряженное состояние — объемным. Тогда главные компоненты тензоров напряжений и деформаций запишем как (см. рис. 2)

$$\sigma_1 = \sigma_x, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_x, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,$$

где σ_x и ε_x — продольные напряжения и деформации, определяемые с помощью метода РСГ, позволяющего по формулам Кольского построить динамическую диаграмму одноосного сжатия образца; σ_r — радиальные напряжения. Максимальные касательные напряжения τ (сопротивление сдвигу) будут на плоскостях, расположенных под углом 45° к оси x , а их значения на этих плоскостях имеют вид

$$\tau = (\sigma_x - \sigma_r)/2. \quad (1)$$

Давление P в образце определится через главные напряжения следующим образом:

$$P = +(\sigma_x + 2\sigma_r)/3. \quad (2)$$

Объемная деформация

$$\theta = \varepsilon_x. \quad (3)$$

Таким образом, если величина σ_r известна, то, используя формулы (2) и (3), в экспериментах с РСГ можно построить кривую объемной сжимаемости грунта и определить сопротивление сдвигу по формуле (1).

Величина радиальной компоненты тензора напряжений может быть получена из решения задачи об упругом деформировании толстостенного цилиндра под действием внутреннего давления [10]. Радиальные напряжения по отношению к обойме будут внутренним давлением, под действием которого обойма испытывает малые упругие деформации. Взаимосвязь между внутренним давлением P_c и окружной деформацией ε_θ обоймы в этом случае следующая:

$$P_c = [E(b^2 - a^2)\varepsilon_\theta]/2a^2. \quad (4)$$

Здесь E — модуль Юнга материала обоймы; a и b — соответственно внутренний и наружный радиусы обоймы.

Таким образом, выражение (4) позволяет по измерениям окружной деформации вычислять радиальную компоненту напряжений и далее с помощью зависимостей (1)–(3) находить сопротивление сдвигу материала образца и давление в нем.

Результаты численного анализа деформирования образца грунта. Как известно, традиционная схема метода Кольского для испытаний конструкционных металлических материалов при сжатии неоднократно подвергалась критическому анализу с точки зрения влияния различных факторов на получаемые диаграммы деформирования. Особое место при этом отводилось выполнению основных предпосылок метода об однородности напряженно-деформируемого состояния (НДС) образца. Было показано, что влиянием сил трения и инерционных сил можно пренебречь, если выполняются определенные условия испытаний, а НДС образца однородно при условии, что длительность нагружающего импульса много больше времени одного пробега импульса по длине образца [11, 12].

Однако подобные исследования в случае испытаний грунтовых сред практически не проводились. Для оценки предположения об однородности НДС по длине образца нами был выполнен численный эксперимент деформирования образца грунта в модифицированной схеме РСГ с пассивным ограничением радиальной деформации [13]. Эффекты трения на боковой поверхности образца при его осевом сжатии в обойме не рассматривались, так как этот вопрос требует отдельного изучения. Моделирование процессов деформирования таблетки грунта в системе РСГ с обоймой проводилось в осесимметричной постановке с использованием программных комплексов [14]. В качестве уравнения состояния грунта была взята модель пластически сжимаемой среды [15] с параметрами, определенными по результатам плосковолнового ударного эксперимента [7]. Расчетная область (образец) покрывалась четырехугольной сеткой (пять ячеек по длине и четыре ячейки по радиусу).

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Здесь показаны уровни напряжений в ячейках по длине образца в различные моменты времени, цифры у линий соответствуют моментам времени, для которых выведены величины напряжений, N — номер ячейки. Полученные данные свидетельствуют о достаточной равномерности распределения напряжений по длине образца: напряжения на торцах и в ячейках образца отличаются друг от друга не более чем на 10%.

Таким образом, результаты численного анализа позволяют сделать вывод о том, что предположение о квазистатическом характере нагружения образца в случае испытания грунтов с пассивным ограничением деформации выполняется достаточно хорошо.

Автоматизация обработки экспериментальных данных. Пакет программ обработки экспериментальных данных кроме приема информации с осциллографов включает операции синхронизации выделен-

ных импульсов, сглаживания импульсов с помощью сплайнов и построения истинной диаграммы деформирования образца, а также позволяет проводить статистическую обработку результатов испытаний, строить регрессионные модели и т. д.

После испытания вся область памяти осциллографа, содержащая импульсы деформаций в мерных стержнях, через интерфейс КОП передается в персональную ЭВМ для обработки. Запись всей области памяти осциллографа удобна тем, что позволяет сформировать на экране дисплея картину, аналогичную экрану осциллографа, и детально исследовать взаимное расположение и форму зарегистрированных импульсов. Кроме того, вручную с клавиатуры терминала вводятся данные по образцу и мерным стержням, а также некоторая сопроводительная информация, необходимая для обработки и идентификации экспериментов. Этот комбинированный файл записывается на гибкий магнитный диск для хранения. При обработке возможна автоматическая и ручная коррекция импульсов, позволяющая устранить кратковременные выбросы сигнала, происходящие иногда при аналого-цифровом преобразовании в осциллографе, и аппроксимировать отдельные участки осциллограммы с целью сглаживания высокочастотных колебаний. Маркерами отмечаются начало и конец зарегистрированных импульсов для их дальнейшей обработки.

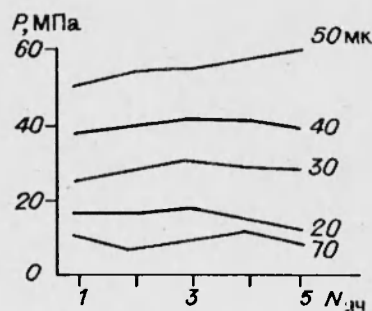


Рис. 3

Известно, что при построении динамических диаграмм деформирования материалов важное значение имеет синхронизация во времени импульсов деформаций в мерных стержнях. Ошибки при синхронизации могут вызывать искажение начального участка диаграммы деформирования. Согласование импульсов деформаций осуществляется по условию равенства (с минимальной погрешностью) сил на торцах образца на протяжении всего испытания [11]. После синхронизации исходных импульсов по формулам Кольского строятся истинная динамическая диаграмма деформирования исследуемого материала при одноосном сжатии и соответствующая ей история изменения скорости деформации.

Процесс приема экспериментальной информации и дальнейшая ее обработка в значительной степени автоматизированы, однако сохранены экспертная оценка выполняемых операций и возможность в любой момент произвести требуемую коррекцию. Благодаря применению ПЭВМ весь процесс обработки от момента испытания до получения готовых результатов в виде таблиц и графиков занимает несколько минут.

Кроме построения динамической диаграммы грунтового материала при одноосном сжатии программный комплекс позволяет по измерениям окружной деформации обоймы на основании зависимостей (1)–(3) определять кривую объемной сжимаемости и зависимость сопротивления сдвигу от давления. Вся обработанная экспериментальная информация (динамические диаграммы деформирования, кривые объемной сжимаемости, сопротивление сдвигу и пр.) заносится в специализированный банк данных для хранения и дальнейшего использования.

Кроме построения динамической диаграммы грунтового материала при одноосном сжатии программный комплекс позволяет по измерениям окружной деформации обоймы на основании зависимостей (1)–(3) определять кривую объемной сжимаемости и зависимость сопротивления сдвигу от давления. Вся обработанная экспериментальная информация (динамические диаграммы деформирования, кривые объемной сжимаемости, сопротивление сдвигу и пр.) заносится в специализированный банк данных для хранения и дальнейшего использования.

Результаты испытаний пластилина. Предлагаемый вариант РСГ был апробирован при испытании пластилина (ОСТ 6-15-1525-86), физико-механические свойства которого близки свойствам глинистых грунтов. Испытания проводились при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), плотность материала в опытах составляла $1,36 \div 1,44\text{ г/см}^3$. Образцами для

испытаний служили таблетки диаметром 20,1 мм и высотой 7,5 ÷ 7,8 мм.

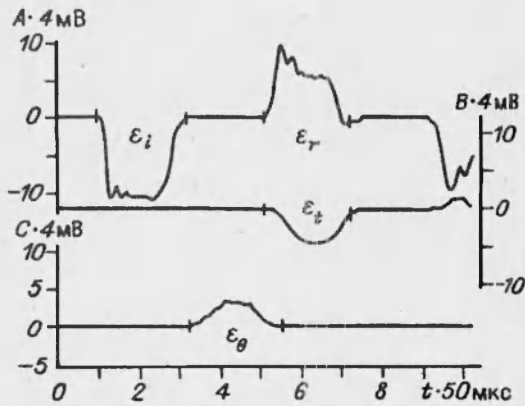


Рис. 4

На рис. 4 представлены записанные в памяти ПЭВМ осциллограммы импульсов, полученных в одном из проведенных экспериментов. Здесь на двух верхних лучах показаны импульсы деформаций в мерных стержнях, а на нижнем — импульс окружной деформации обоймы. Как видно, форма прошедшего импульса близка к форме импульса с обоймы.

Пример диаграмм деформирования $\sigma, \sim \epsilon$, пластилина при одноосном сжатии с ограничением радиальной деформации и соответствующие истории изменения скорости деформации $\dot{\epsilon}, \sim \epsilon$, приведены на рис. 5, а, б, где маркеры служат для установления соответствия кривых на этих рисунках.

Из полученных данных следует, что диаграммы деформирования пластилина имеют нелинейный характер, нагрузочные и разгрузочные ветви диаграмм сильно отличаются друг от друга. Среднее значение модуля ветви нагрузки составляет ~ 3000 МПа. Ветвь разгрузки имеет более сложный характер и состоит условно из двух участков. Часть диаграммы от точки с максимальными напряжениями до точки с максимальными деформациями имеет отрицательный наклон. Такое поведение материала, по-видимому, свидетельствует о вязкостных свойствах пластилина. Далее следует участок ветви разгрузки с модулем порядка 15000–20000 МПа, величина которого зависит, по-видимому, от скорости деформации и давления, достигнутых в опыте.

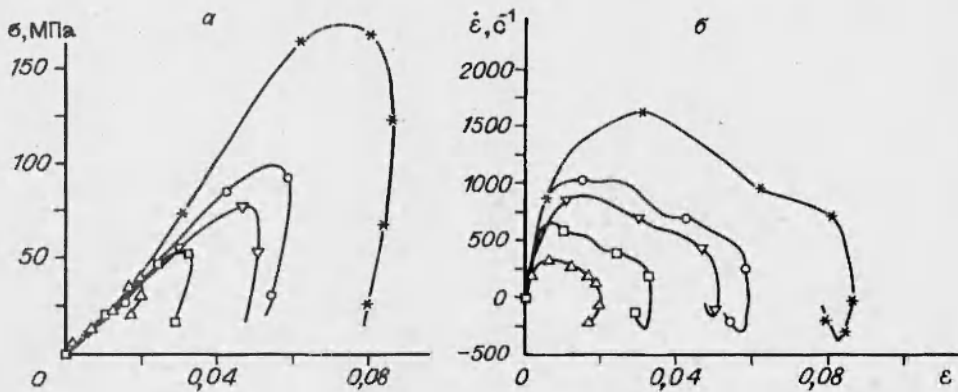


Рис. 5

На рис. 6 показана зависимость сопротивления сдвигу от давления, полученная с использованием разработанной методики. Необходимо отметить, что величины давлений и сопротивления сдвигу определялись в соответствии с формулами (1)–(3) по максимуму напряжений, достигнутых в данном испытании. Экспериментальные результаты, обработанные методом наименьших квадратов, аппроксимируются прямой линией и могут быть представлены в виде уравнения $\tau = C + \operatorname{tg} \varphi \cdot P$ с параметрами

$C = 0,34$ МПа и $\varphi = 10,9^\circ$ (C — коэффициент сцепления, φ — угол внутреннего трения). Уравнение подобного типа известно как условие Кулона — Мора для мягких грунтов [16]. Представляет интерес сравнение полученных постоянных с константами для глинистых грунтов, определенных в статических условиях. Значения параметров сдвиговой прочности мягких грунтов, как известно, изменяются в широких пределах в зависимости от начального состояния материала, которое определяется пористостью, влажностью, зерновым составом грунтовой среды. Для глинистых грунтов величина сцепления, судя по литературным данным, может колебаться от 0,01 до 0,2 МПа, а угол внутреннего трения от 6 до 28° [17].

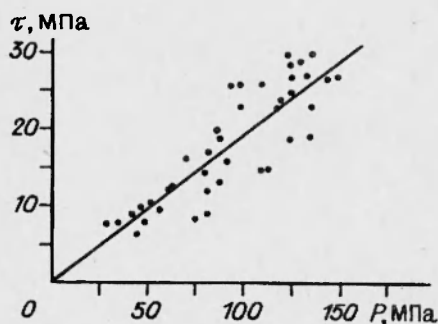


Рис. 6

Таким образом, параметры сдвиговой прочности пластилина, полученные в данной работе, для области скоростей деформации 10^3 с^{-1} достаточно хорошо соотносятся с данными для глинистых грунтов, определенными при статических и квазистатических испытаниях. Это подтверждает предположение, высказанное в работе [17], что угол внутреннего трения грунтов слабо зависит от скорости деформации.

Выводы. Предложен вариант метода Кольского испытаний грунтовых сред, существенно расширяющий его возможности. Использование ограничивающей обоймы и измерения окружной деформации обоймы позволяют определять кривую объемной сжимаемости и зависимость сопротивления сдвигу от давления. Возможности предложенного метода проиллюстрированы на примере испытания пластилина. Представляется, что подобная методика найдет применение при анализе процессов динамического деформирования грунтовых сред и сыпучих материалов, а получаемые результаты могут быть с успехом использованы при формулировке уравнений состояния и определении их параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. 1950. Вып. 4. С. 108–119.
2. Динамика удара / Дж. А. Зукас, Т. Николас, Х. Ф. Свифт и др. М.: Мир, 1985.
3. Griffiths L. J., Martin D. J. A study dynamic behaviour of a carbon fiber composites using the split Hopkinson pressure bar // J. Phys. D: Appl. Phys. 1974. V. 7. P. 2329–2341.
4. Кокошвили С. М. Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978.
5. Christensen R. J., Swanson S. R., Brown N. S. Split — Hopkinson bar tests on rock under confining pressure // Exp. Mech. 1972. V. 22, N 11. P. 508–513.
6. Gong J. C., Malvern L. E. Passively confined test of axial dynamic compressive strength of concrete // Exp. Mech. 1990. V. 47. P. 55–59.
7. Брагов А. М., Грушевский Г. М. Некоторые закономерности динамического деформирования мягких грунтов // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. М., 1991. Т. 8. С. 64–69.
8. Bragov A. M., Grushevsky G. M. Compressibility of soft soils under shock load within the pressure range up to 3 GPa // Wave processes in machinery and structures: EVROMECH 295. N. Novgorod, 1992. P. 40.

9. Брагов А. М., Леонтьев Е. А., Олонов Л. К., Русин Е. Е. Газовая пушка для исследования процессов высокоскоростного деформирования твердых тел // Прикл. проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т, 1983. Вып. 24. С. 150-155.
10. Беляев Н. М. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1976.
11. Bertholf L. D., Karnes C. H. Two-dimensional analysis of the split Hopkinson pressure bar system // J. Mech. Phys. Solids. 1975. V. 1, N 23. P. 1-19.
12. Брагов А. М., Ломунов А. К. Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского // Прикл. проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т, 1984. Вып. 28. С. 125-137.
13. Грушевский Г. М., Фомина Е. В. Численно-экспериментальное исследование модифицированного метода разрезного стержня Гопкинсона // Прикл. проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Нижегород. ун-т, 1992. Вып. 52. С. 128-134.
14. Баженов В. Г., Кочетков А. В., Крылов С. В. и др. Численное решение двумерных нестационарных задач динамики тонкостенных упругопластических конструкций с заполнителем // Прикл. проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т, 1981. Вып. 17. С. 46-57.
15. Ионов В. А., Огибалов П. М. Прочность пространственных элементов конструкций. М.: Высш. шк., 1979.
16. Терцаги К. Теория механики грунтов. М., 1961.
17. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений // Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1991.

Поступила в редакцию 8/VI 1994 г.
