

УДК 539.3

**ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦА  
НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АНАЛИЗА  
МЕТОДИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ  
В ЖЕСТКОЙ ОБОЙМЕ\***

© 2016 г. **Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю.,  
Ламзин Д.А., Баландин Вл.Вл.**

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

bragov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 26.09.2016*

Проведен теоретико-экспериментальный анализ модификации метода Кольского для испытаний материалов в упруго деформируемой обойме. Получена формула для определения радиальной деформации образца по импульсу деформации, регистрируемому на наружной поверхности обоймы. Формула следует из решения задачи о распределении напряжений в толстостенных упруго деформируемых под действием внутреннего давления цилиндрах (задача Ламе). Для апробации формулы проведены эксперименты на сжатие в обоймах разной жесткости мелкозернистого бетона, класса по прочности на сжатие В25, и мерзлого песка с размером частиц не более 1 мм при разных скоростях деформации. На основании результатов испытаний оценено влияние податливости обоймы на поведение кривых деформирования и даны рекомендации по применению полученной формулы.

*Ключевые слова:* динамика, метод Кольского, задача Ламе, мелкозернистый бетон, мерзлый грунт.

**Введение**

Исследование процессов высокоскоростного деформирования и разрушения конструкционных материалов является одним из актуальных направлений современной инженерной науки. Высокоскоростные динамические воздействия характеризуются непрерывным изменением параметров, высокой интенсивностью и малой продолжительностью, а сам отклик материала на приложенную нагрузку порой демонстрирует непредсказуемые эффекты. При современном проектировании и расчете строительных конструкций широко используются компьютерные программы (SCAD, ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, LS-DYNA и др.), в основу которых положены численные методы решения уравнений механики деформируемого твердо-

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №16-38-60122 мол\_а\_дк, №16-01-00524) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-6944.2016.8).

го тела. При этом напряженно-деформированное состояние (НДС) моделируемой конструкции определяется математической моделью материала, набором параметров и констант, заложенных в расчет. Для определения разнообразных механических характеристик материалов и оснащения математических моделей материальными функциями, а также для построения предельных поверхностей (поверхности текучести, поверхности разрушения и др.) с целью разработки новых и проверки существующих гипотез прочности необходимо проводить соответствующие динамические испытания. Однако в связи с наличием явлений инерции, особенностей распространения волн и принятыми упрощениями экспериментальные методики требуют тщательного анализа, проверки достоверности и адекватности заложенных в их основу предпосылок. Настоящая статья посвящена теоретико-экспериментальному анализу модификации метода Кольского для испытаний материалов в условиях пассивного ограничения радиальной деформации.

### 1. Модификация метода Кольского для испытаний материалов в жесткой обойме

С целью определения свойств хрупких материалов, грунтовых сред, композитов в условиях сложного напряженного состояния разработана модификация метода Кольского для испытаний материалов в условиях пассивного ограничения радиальной деформации [1–14]. В этой модификации испытываемый образец размещается между торцами мерных стержней в жесткой металлической упруго деформируемой обойме, препятствующей его радиальной раздаче (рис. 1). При этом предполагается, что радиальной деформацией образца по сравнению с продольной можно пренебречь и считать деформированное состояние одномерным, а напряженное состояние трехмерным, то есть  $\sigma_1 = \sigma_x$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_x$ ,  $\epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_r \approx 0$ .

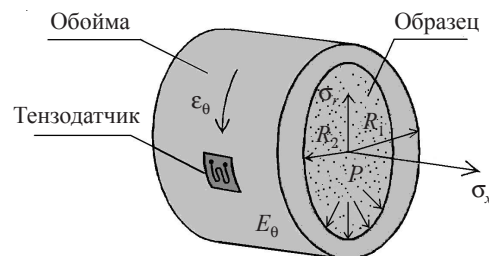


Рис. 1

Продольные напряжения  $\sigma_x(t)$  и деформации  $\epsilon_x(t)$ , скорость продольной деформации  $\dot{\epsilon}_x(t)$  определяются по формулам традиционной методики Кольского, а радиальные напряжения  $\sigma_r(t)$  определяются по импульсу деформации  $\epsilon_\theta(t)$ , зарегистрированному на металлической обойме, по формуле, полученной из решения задачи Ламе об упругом деформировании толстостенной трубы (или полого цилиндра) под действием внутреннего давления [7]:

$$\sigma_x(t) = \frac{EA}{A_S} \epsilon^T(t),$$

$$\epsilon_x(t) = -\frac{2c}{L_S} \int_0^t \epsilon^R(t) dt,$$

$$\dot{\varepsilon}_x(t) = -\frac{2c}{L_S} \varepsilon^R(t),$$

$$\sigma_r(t) = \frac{1}{2R_2^2} [E_0(R_1^2 - R_2^2) \varepsilon_0(t)].$$

Здесь  $E, A, c$  – модуль Юнга, площадь поперечного сечения и скорость звука в мерных стержнях соответственно;  $A_S$  и  $L_S$  – площадь сечения и длина образца;  $E_0$  – модуль Юнга материала обоймы;  $\varepsilon^T(t)$  и  $\varepsilon^R(t)$  – прошедший и отраженный импульсы деформации в мерных стержнях;  $R_1$  и  $R_2$  – наружный и внутренний радиусы обоймы.

Давление  $P(t)$ , объемная деформация  $\theta(t)$ , интенсивность напряжений  $\sigma_i(t)$  и деформаций  $\varepsilon_i(t)$  как функции времени при испытании образца в обойме определяются следующим образом:

$$P(t) = \frac{\sigma_x(t) + 2\sigma_r(t)}{3}, \quad \theta(t) \approx \varepsilon_x(t), \quad \sigma_i(t) = \sigma_x(t) - \sigma_r(t), \quad \varepsilon_i(t) \approx \frac{2}{3} \varepsilon_x(t).$$

Далее из полученных параметрических зависимостей после их взаимной синхронизации исключается время как параметр, строятся диаграмма одноосного деформирования образца  $\sigma_x \sim \varepsilon_x$ , кривая объемной сжимаемости  $P \sim \theta$ , диаграмма «в интенсивностях»  $\sigma_i \sim \varepsilon_i$  и другие зависимости.

Однако при нагружении образца, размещенного в металлической обойме, все же происходит его некоторая радиальная раздача, зависящая от жесткости обоймы, поэтому представляет практический интерес определение величины радиальных деформаций для оценки их вклада в объемную деформацию и интенсивность деформаций. С этой целью рассматриваемая методика была проанализирована и получена теоретическая формула, позволяющая определять радиальную деформацию образца по импульсу деформации, зарегистрированному на наружной поверхности обоймы. На основании проведенных экспериментов с мелкозернистым бетоном и замороженным песком с использованием полученной формулы были построены временные зависимости радиальных деформаций в процессе нагружения образца, а также оценен вклад радиальной деформации в объемную деформацию и интенсивность деформаций.

## 2. Вывод теоретической формулы и анализ экспериментальных результатов

Рассматривается НДС жесткой металлической обоймы, которая представляет собой толстостенную упруго деформируемую трубу, находящуюся под действием внутреннего давления  $p$ , причем радиальные напряжения образца на его наружной поверхности равны давлению  $p$  (рис. 2).

Значения растягивающих напряжений и деформаций удлинения будем считать положительными, а значения сжимающих напряжений и деформаций укорочения – отрицательными. Величины напряжений в точках, лежащих на окружности радиуса  $R$  внутри стенки трубы, которые действуют в плоскости чертежа вдоль радиуса ( $\sigma_r$ ) и перпендикулярно ему ( $\sigma_t$ ), определяются по формулам [15]:

$$\sigma_r = \frac{pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 - \frac{R_1^2}{R^2} \right], \quad \sigma_t = \frac{pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 + \frac{R_1^2}{R^2} \right].$$

Поскольку рассматриваемый полый цилиндр не имеет дна, третье главное напряжение  $\sigma_z$ , действующее в обойме перпендикулярно плоскости чертежа (рис. 2а) и вызванное давлением на днище, равно нулю.

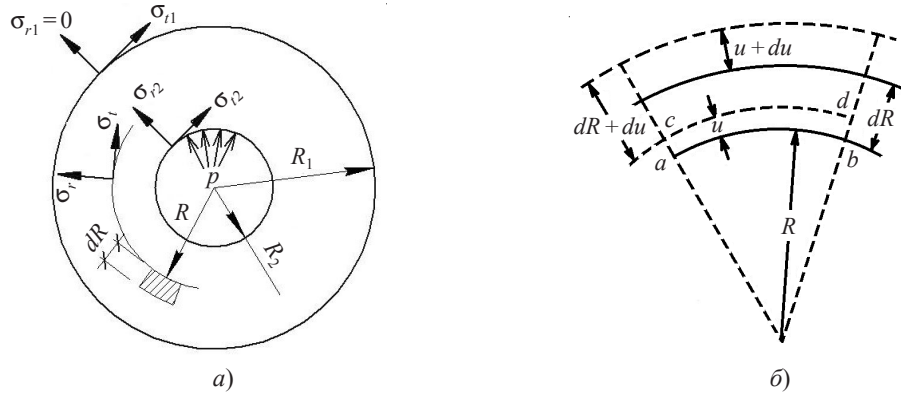


Рис. 2

Деформация трубы заключается в ее удлинении вдоль оси и в радиальном перемещении всех точек ее поперечных сечений. Рассматривая упругую деформацию части узкого кольца материала радиусом  $R$  и толщиной  $dR$  внутри стенки трубы (рис. 2б), можно получить величины относительных перемещений  $\epsilon_r$  и  $\epsilon_t$  точек, лежащих на окружности радиуса  $R$  внутри стенки трубы, в направлении соответствующих напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_t$  [2]:

$$\epsilon_r = \frac{du}{dR} = \frac{1}{E}[\sigma_r - \nu\sigma_t], \quad \epsilon_t = \frac{u}{R} = \frac{1}{E}[\sigma_t - \nu\sigma_r],$$

где  $u$  – радиальное перемещение точек, лежащих на окружности радиуса  $R$  внутри стенки трубы,  $du$  – изменение толщины выделенного элемента, а  $E$  и  $\nu$  – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала обоймы.

Таким образом, значения напряжений  $\sigma_{r1}$  и  $\sigma_{t1}$  в точках наружной поверхности обоймы и соответствующих им относительных удлинений  $\epsilon_{r1}$  и  $\epsilon_{t1}$  будут равны:

$$\sigma_{r1} = \frac{pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 - \frac{R_1^2}{R_1^2} \right] = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_{t1} = \frac{pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 + \frac{R_1^2}{R_1^2} \right] = \frac{2pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2}, \quad (2)$$

$$\epsilon_{r1} = \frac{1}{E}[\sigma_{r1} - \nu\sigma_{t1}] = -\frac{\nu}{E}\sigma_{t1}, \quad (3)$$

$$\epsilon_{t1} = \frac{1}{E}[\sigma_{t1} - \nu\sigma_{r1}] = \frac{\sigma_{t1}}{E}. \quad (4)$$

В точках на внутренней поверхности обоймы значения напряжений  $\sigma_{r2}$  и  $\sigma_{t2}$  и соответствующих им относительных деформаций  $\epsilon_{r2}$  и  $\epsilon_{t2}$  будут равны:

$$\sigma_{r2} = \frac{pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right], \quad (5)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} \right], \quad (6)$$

$$\varepsilon_{r2} = \frac{1}{E} [\sigma_{r2} - \nu\sigma_{t2}], \quad (7)$$

$$\varepsilon_{t2} = \frac{1}{E} [\sigma_{t2} - \nu\sigma_{r2}]. \quad (8)$$

Поскольку образец в процессе нагружения находится в плотном соприкосновении с внутренней поверхностью обоймы, величина  $\varepsilon_{t2} = u_2/R_2$  будет являться искомой радиальной деформацией образца  $\varepsilon_{r,s}$ . Величину относительного удлинения  $\varepsilon_{t1}$  можно определить по показанию  $\varepsilon_\theta$  тензодатчика, приклеенного на наружной поверхности обоймы. Для вычисления  $\varepsilon_{t2}$  через  $\varepsilon_{t1}$  подставим выражения (5) и (6) в (8). Тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon_{t2} &= \frac{1}{E} \left[ \frac{pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \cdot \left[ 1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} \right] - \frac{\nu pR_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[ 1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right] \right] = \\ &= \frac{p[R_2^2(1-\nu) + R_1^2(1+\nu)]}{E(R_1^2 - R_2^2)}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$p = \frac{E(R_1^2 - R_2^2)}{R_2^2(1-\nu) + R_1^2(1+\nu)} \varepsilon_{t2}. \quad (9)$$

Выразим  $p$  из (2), учитывая (4):

$$p = \frac{E(R_1^2 - R_2^2)}{2R_2^2} \varepsilon_{t1}. \quad (10)$$

Следовательно,

$$\frac{E(R_1^2 - R_2^2)}{R_2^2(1-\nu) + R_1^2(1+\nu)} \varepsilon_{t2} = \frac{E(R_1^2 - R_2^2)}{2R_2^2} \varepsilon_{t1}$$

или

$$\varepsilon_{r,s}(t) = \frac{R_2^2(1-\nu) + R_1^2(1+\nu)}{2R_2^2} \varepsilon_\theta(t). \quad (11)$$

Формула (11) позволяет определять радиальную деформацию образца  $\varepsilon_{r,s}$  по импульсу деформации, зарегистрированному на наружной поверхности обоймы  $\varepsilon_\theta$ . С учетом радиальной деформации величины объемной деформации и интенсивности деформаций образца определяются по формулам (радиальная и продольная деформации имеют разные знаки):

$$\begin{aligned} \theta &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_x + 2\varepsilon_r, \\ \varepsilon_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} = \frac{2}{3} (|\varepsilon_x| + |\varepsilon_r|). \end{aligned}$$

Для экспериментального исследования влияния радиальной деформации на механические характеристики были проведены динамические испытания образцов мелкозернистого бетона [16, 17] и замороженного песка в металлических обоймах. Подбор состава бетонной смеси производился в соответствии с ГОСТ 27006-86 [18] и рекомендациями к нему [19]. Для приготовления смеси использовались цемент марки 400, песок с модулем крупности 2, а также пластифицирующая добавка Miraplast FK-63 и стабилизатор Реостаб. Соотношение компонентов (цемент, вода и мелкий заполнитель) составляло Ц:В:П = 1:0,6:3. Класс бетона по прочности на осевое сжатие В25 был установлен в результате испытаний образцов-кубов по ГОСТ 10180-90 [20]. Плотность экспериментальных образцов песка с размером частиц не более 1 мм в естественном (неувлажненном) состоянии составляла 1,75 г/см<sup>3</sup>. После насыщения водой и последующего замораживания плотность образцов возрастала до 2,1 г/см<sup>3</sup>. Таким образом, влажность испытанного грунта составляла 20%. Необходимость испытаний грунта определялась тем, что в экспериментах с бетоном технологически сложно было получить плотное прилегание образцов к стенке обоймы. Этого удалось избежать при испытаниях мерзлого грунта. Экспериментальные образцы имели форму таблеток диаметром 20 мм и толщиной 10 мм. Металлические обоймы имели наружный диаметр 30 мм и 40 мм, внутренний диаметр 20 мм, длину 10 мм. Были проведены серии экспериментов при разных скоростях продольной деформации.

Полученные в результате испытаний характерные зависимости давления от объемной деформации и интенсивности напряжений от интенсивности деформаций с учетом радиальной деформации и без ее учета для бетона показаны на рис. 3.

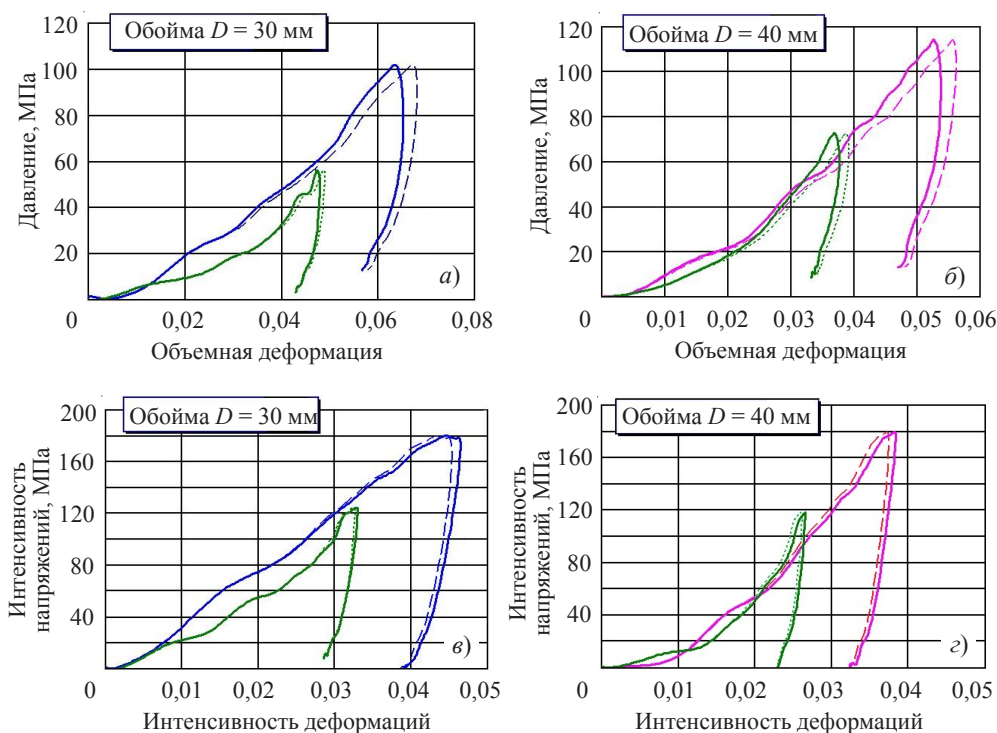


Рис. 3

На рис 3а, в изображены графики для обоймы  $D = 30$  мм. Синяя сплошная кривая соответствует испытанию с учетом радиальной деформации (1300 1/с), синяя штриховая – без учета радиальной деформации (1300 1/с); зеленая сплошная кривая – с учетом радиальной деформации (800 1/с), зеленая штриховая – без учета радиальной деформации (800 1/с).

На рис 3б, г изображены графики для обоймы  $D = 40$  мм. Розовая сплошная кривая соответствует испытанию с учетом радиальной деформации (1200 1/с), розовая штриховая – без учета радиальной деформации (1200 1/с); зеленые сплошная и штриховая кривые соответствуют испытаниям с учетом и без учета радиальной деформации (800 1/с).

Результаты испытаний замороженного песка приведены на рис. 4. При построении экспериментальных кривых значения растягивающих напряжений и деформаций удлинения были приняты со знаком минус, а значения сжимающих напряжений и деформаций укорочения – со знаком плюс. Видно, что при увеличении степени и скорости деформации, а также величины достигнутых напряжений радиальная деформация вносит некоторый вклад в величину объемной деформации, вызывая изменение одномерного деформированного состояния образца. Однако этот вклад очень мал и сравним с погрешностью эксперимента.

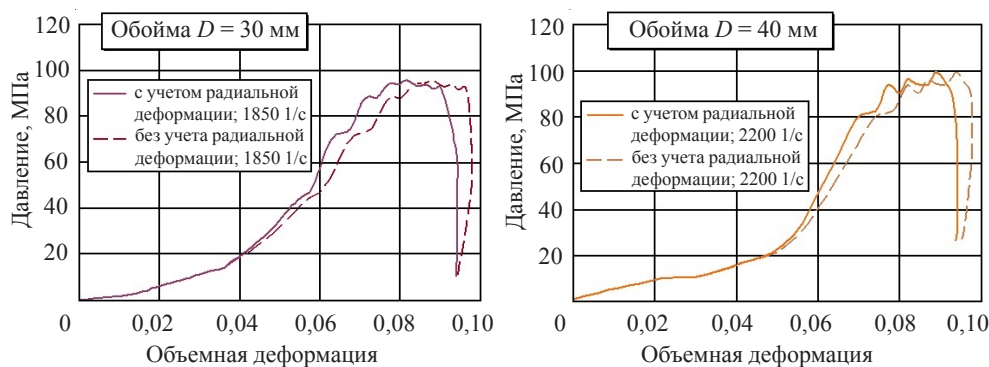


Рис. 4

### Заключение

Проведен теоретико-экспериментальный анализ модификации метода Кольского, используемой для определения механических свойств материалов при сложном напряженном состоянии. Установлено, что при испытаниях материалов в толстостенных металлических обоймах величина радиальной деформации мала, а полученная формула должна использоваться при увеличении степени и скорости деформации в сильно податливых обоймах.

### Список литературы

1. Gasagrande A., Schanon W.Z. Strength of soil under dynamic loads. *Proc. ASCE*. 1948. 74(4). P. 29.
2. Felice C.W., Gaffney E.S., Brown J.A. Dynamic high stress experiments on soil. *Geotechnical Testing J.* 1987. 10(4). P. 192–202.
3. Vejera G.E., Ross C.A. High strain rate testing of unsaturated sands using a SHPB. *Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engng. and Soil Dynamics*. St-Louis. 1995. P. 31–34.

4. Semblat J.-F., Luong M.P., Gary G. 3D-Hopkinson bar: new experiments for dynamic testing on soils. *Soils and Foundations*. 1999. 39(1). P. 1–10.
5. Forquin P., Gary G., Gating F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. 35. P. 425–446.
6. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils. *DYMAT Journal*. 1994. Vol. 1. No 3. P. 253–259.
7. Bragov A.M., Gandurin V.P., Grushevskii G.M., Lomunov A.K. New potentials of Kol'skii's method for studying the dynamic properties of soft soils. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1996. 36(3). P. 476–481.
8. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils. *Exper. Mechanics*. 1996. Vol. 36. No 3. P. 237–242.
9. Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Lomunov A.K. Analysis of the applicability of a modified Kolskii's method for dynamic tests of soils in a deformable casing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2000. Vol. 41. No 3. P. 519–525.
10. Bragov A.M., Demenko P.V., Kruszka L., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Investigation of dynamic compressibility and shear resistance of soft soils in a wide range of strain rate and pressure. *Fifth European Conference «Numerical Methods in Geotechnical Engineering»*. Mestat (ed.). Paris: Presses de l'ENPC/LCPC, 2002. P. 909–917.
11. Bragov A.M., Kotov V.L., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Measurement of the dynamic characteristics of soft soils using the Kolsky method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2004. Vol. 45. No 4. P. 580–585.
12. Брагов А.М., Гандурин В.П., Грушевский Г.М., Ломунов А.К. Методические особенности изучения динамической сжимаемости мягких грунтов в диапазоне давлений 0,05–1,5 ГПа. *Химическая физика*. 1995. Т. 14. № 2–3. С. 126–135.
13. Брагов А.М., Грушевский Г.М., Ломунов А.К., Сергеичев И.В., Прауд У. Исследование динамической сжимаемости сухого песка в диапазоне амплитуд нагрузок до нескольких гигапаскалей. *Проблемы прочности и пластичности*. Нижегород. госуниверситет, 2006. Вып. 68. С. 221–228.
14. Ломунов А.К., Брагов А.М., Крицин А.В. Исследование анизотропии механических свойств некоторых пород древесины при высокоскоростном нагружении. *XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*: Сб. докл. Казань, 20–24 авг. 2015 г. Казань: Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 2366–2369.
15. Беляев Н.М. *Сопротивление материалов*. М.: Наука, 1976. 608 с.
16. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении. *Приволжский научный журнал*. 2014. №4. С. 11–21.
17. Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А. Исследование энергоемкости мелкозернистых бетонов при динамическом нагружении. *Приволжский научный журнал*. 2015. №2. С. 23–31.
18. ГОСТ 27006-86. *Бетоны. Правила подбора состава*.
19. *Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов* (к ГОСТ 27006-86). М.: ЦИТП, 1990.
20. ГОСТ 10180-90. *Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам*.

#### References

1. Gasagrande A., Schanon W.Z. Strength of Soil under Dynamic Loads. *Proc. ASCE*. 1948. 74(4). P. 29.
2. Felice C.W., Gaffney E.S., Brown J.A. Dynamic high stress experiments on soil. *Geotechnical Testing J.* 1987. 10(4). P. 192–202.
3. Vejera G.E., Ross C.A. High strain rate testing of unsaturated sands using a SHPB. *Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engng. and Soil Dynamics*. St-Louis. 1995. P. 31–34.



4. Semblat J.-F., Luong M.P., Gary G. 3D-Hopkinson bar: new experiments for dynamic testing on soils. *Soils and Foundations*. 1999. 39(1). P. 1–10.
5. Forquin P., Gary G., Gatuingt F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. 35. P. 425–446.
6. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils. *DYMAT Journal*. 1994. Vol. 1. No 3. P. 253–259.
7. Bragov A.M., Gandurin V.P., Grushevskii G.M., Lomunov A.K. New potentials of Kol'skii's method for studying the dynamic properties of soft soils. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1996. 36(3). P. 476–481.
8. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils. *Exper. Mechanics*. 1996. Vol. 36. No 3. P. 237–242.
9. Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Lomunov A.K. Analysis of the applicability of a modified Kolskii's method for dynamic tests of soils in a deformable casing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2000. Vol. 41. No 3. P. 519–525.
10. Bragov A.M., Demenko P.V., Kruszka L., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Investigation of dynamic compressibility and shear resistance of soft soils in a wide range of strain rate and pressure. *Fifth European Conference "Numerical Methods in Geotechnical Engineering"*. Mestat (ed.). Paris. Presses de l'ENPC/LCPC. 2002. P. 909–917.
11. Bragov A.M., Kotov V.L., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Measurement of the dynamic characteristics of soft soils using the Kolsky method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2004. Vol. 45. No 4. P. 580–585.
12. Bragov A.M., Gandurin V.P., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. Metodicheskie osobennosti izucheniya dinamicheskoy szhimaemosti myagkikh gruntov v diapazone davleniy 0,05–1,5 GPa [Methodical features of studying soft soils dynamic compressibility in the pressure range 0.05–1.5 GPa]. *Khimicheskaya fizika [Russian Journal of Physical Chemistry]*. 1995. Vol. 14. No 2–3. P. 126–135 (In Russian).
13. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Praud U. Issledovanie dinamicheskoy szhimaemosti sukhogo peska v diapazone amplitud nagruzok do neskol'kikh gigapaskaley [Studying the dynamic compressibility of dry sand in the range of loading amplitudes of up to several GPa]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2006. Vol. 68. P. 221–228 (In Russian).
14. Lomunov A.K., Bragov A.M., Kritsin A.V. Issledovanie anizotropii mekhanicheskikh svoystv nekotorykh porod drevesiny pri vysokoskorostnom nagruzhenii [A study of the anisotropy of the mechanical properties of certain types of wood with the high speed loading]. *XI Vserossiyskiy s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki: Sb. dokl. Kazan, 20–24 avg. Kazan. Kazan (Volga region) Federal University Publ.* 2015. P. 2366–2369 (In Russian).
15. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov [Strength of Materials]*. Moscow. Nauka Publ. 1976. 608 p. (In Russian).
16. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv melkozernistogo betona pri dinamicheskom nagruzhenii [Study of mechanical properties of fine concrete at dynamic loading]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. 2014. No 4. P. 11–21 (In Russian).
17. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A. Issledovanie energoemkosti melkozernistykh betonov pri dinamicheskom nagruzhenii [Research of power-consuming of fine concretes at dynamic loading]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*. 2015. No 2. P. 23–31 (In Russian).
18. GOST 27006-86. *Betony. Pravila podbora sostava* (In Russian).
19. *Rekomendatsii po podboru sostavov tyazhelykh i melkozernistykh betonov (k GOST 27006-86)*. Moscow. TsITP Publ. 1990 (In Russian).
20. GOST 10180-90. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam* (In Russian).

**ESTIMATION OF RADIAL STRAIN OF SPECIMEN ON THE BASIS  
OF THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS  
OF A TECHNIQUE DYNAMIC TESTS OF MATERIALS IN A RIGID FERRULE**

**Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Balandin V.I.VI.**

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

The theoretical and experimental analysis of modification of the Kolsky method for tests of materials in elastostrained ferrule is carried out. The formula for definition of radial strain of the specimen by the impulse of strain registered on an external surface of a ferrule is obtained. This formula is based on solving the problem of the distribution of stresses in the thick-walled elastically deformable under internal pressure cylinders (Lame's theory). For approbation of obtained formula experiments on compression in ferrules of different rigidity of a fine concrete B25 and a frozen sand with a particle size of not more than 1 mm were performed at different strain rates. On the basis of results of tests influence of a compliance of a ferrule on obtained curve deformations is estimated and recommendations about application of the obtained formula are given.

*Keywords:* dynamics, Kolsky method, Lame's theory, fine concrete, frozen soil.