

ISSN 1815 - 5235
ISSN (online) 2587 - 8700

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Обзорно-аналитический и
научно-технический журнал**

**№ 6
декабрь**



**STRUCTURAL MECHANICS OF
ENGINEERING CONSTRUCTIONS
AND BUILDINGS**

2017

Сведения о журнале

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал «*Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*» знакомит читателей с достижениями отечественных и зарубежных ученых в области геометрии пространственных конструкций, сопротивления материалов, строительной механики, теории упругости и расчета строительных и машиностроительных конструкций, освещает вопросы научно-технического прогресса в строительстве и машиностроении, публикует аналитические обзоры по теме журнала.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране наследия. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ №ФС77-19706 от 13 апреля 2005 г. Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 20479 (полгода) и 80344 (год).

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, сформированный Минобрнауки России, для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Перечень вступил в силу 1 декабря 2015 г.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

АНДРЕЕВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (МГСУ, Москва),
БАЖЕНОВ В.А., акад. Национальной Академии педагогических наук Украины, д.т.н., профессор (КНУСА, Киев, Украина),
БОНДАРЕНКО В.М., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
ГОЛИК В.И., д. член РАЕН, д.т.н., профессор (Северо-Кавказский ГТУ, Владикавказ),
REINHARD F. SACHSENHOFER, PhD, Professor (Montanuniversität Leoben, Австрия),
ИВАНОВ С.П., д.т.н., профессор (ПГТУ – ВОЛГАТЕХ, Йошкар-Ола),
КАРПЕНКО Н.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
КОЛЧУНОВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ЮЗГУ, Курск),
GIUSEPPE MANDRONE, PhD, Ass. Prof. Engineering geology (University of Torino, Италия),
KRASIC SONJA, PhD (University of Nis, Nis, Serbia),
КРИВОШАПКО С.Н., д.т.н., профессор (РУДН, Москва),
ЛЯХОВИЧ Л.С., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ТГАСА, Томск),
ТРАВУШ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ЭНПИ, Москва),
ЯКУПОВ Н.М., чл-корр. РИА, д.т.н., профессор (ИММ КазНЦ РАН, Казань)

РЕДАКЦИЯ:

д.т.н., профессор С.Н. КРИВОШАПКО (РУДН, Москва) – *главный редактор*,
д.т.н., профессор В.Н. Иванов (РУДН, Москва) – *зам. главного редактора*,
д.т.н., профессор В.В. Ванин (Киевский политехнический университет, Украина),
д.т.н. С.Е. Лисичкин (ООО «ИЦСКТЭ»); д.т.н., профессор Е.М. Зверьяев (ИПМ РАН, Москва); д.т.н., профессор В.И. Обозов (ЦНИИСК, Москва);
PhD, Assoc. Professor Vui Xuan Nam (Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam);
д.т.н., профессор Р.С. Санжаровский (Евразийский Нац. У-т им. Гумилева, Казахстан);
д.т.н., профессор В.П. Агапов (МГСУ, Москва);
И.А. Мамиева (РУДН, Москва) – *исполнительный редактор*;
Е.А. Гринько – *редактор англоязычного Интернет-сайта журнала*.

Официальный Интернет-сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics>

Англоязычный Интернет-сайт журнала: <http://smjournal.narod.ru>

Технический секретарь *Е.М. Туликова*; компьютерная верстка *Т.И. Карелина*.

Почтовый адрес журнала: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, РУДН,
Инженерная академия, Департамент Архитектуры и строительства
Тел.: (495) 955-08-58; Факс: (495) 955-08-58

E.mail: sn_krivoshapko@mail.ru, i_mamieva@mail.ru

Тираж 300 экз.

Учредитель: Российский университет дружбы народов, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, РУДН

Типография ИПК РУДН, 117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

© Российский университет дружбы народов, 2017

© С.Н. Кривошапко, фото на 1-ой странице обложки (ВДНХ, Москва)

Строительная механика инженерных конструкций и сооружений

Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6 тел.: (495) 955-08-58; fax: (495)-955-08-58

С о д е р ж а н и е

№ 6, 2017 год

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6

Геометрические исследования срединных поверхностей

тонких оболочек

Якупов С.Н., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М. Параметризация элементов конструкций сложной геометрии..... 4

Расчет тонких упругих оболочек

Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Васильцов С.В., Пшенов А.А. Расчет системы из двух замкнутых цилиндрических оболочек с промежуточной опорой..... 10

Теория упругости

Кудрявцев С.Г., Булдакова Ю.М. Анализ напряженного состояния трехслойного анизотропного основания..... 16

Расчет и проектирование строительных конструкций

Санжаровский Р.С., Манченко М.М. Ошибки международных норм по железобетону и правила Еврокода..... 25

Демьянов А.И., Колчунов Вл.И., Покусаев А.А. Экспериментальные исследования деформирования железобетонных конструкций при кручении с изгибом..... 37

Бондаренко В.М., Пятикрестовский К.П. Длительное силовое деформирование структурированных материалов..... 45

Численные методы расчета конструкций

Мусаев В.К. Численное моделирование нестационарных волн напряжений в упругой полуплоскости с прямоугольной полостью при сосредоточенном вертикальном взрывном воздействии..... 49

Расчет подземных сооружений

Разоренов Ю.И., Дзеранов Б.В. Параметры породных конструкций при подземной добыче руд..... 55

Расчеты на устойчивость

Иванов С.П., Иванов О.Г., Иванова А.С. Устойчивость пластин под действием сдвигающих нагрузок..... 68

Экспериментальные исследования

Sohounhloue A.Y. Jamik, Gbaguidi Aisse Gerard Leopold, Solbes Bernard, Galimard Philippe. Borassus aethiopicum mart of Benin used as reinforcement in concrete: Adhesion characterization..... 74

Information about the Journal

Review-and-analytic and scientific-and-technical journal “*Structural Mechanics of Engineering Constructions and Building*” shows the readers round the achievements of Russian and foreign scientists in the area of geometry of spatial structures, strength of materials, structural mechanics, theory of elasticity, and analysis of building and machine-building structures, illumines the problems of scientific-and-technic progress in building and machine-building, publishes analytic reviews on the aims and scope of the Journal.

The Journal was founded in 2005. The Journal was registered by Federal Service of Supervision for Observance of Laws in the sphere of Public Communications and Heritage Protection. The certificate about registration of a means of public information: ПИ №ФЦ77-19706, April 13, 2005. Subscription index of the catalog of agency “Rospechat” is 20479 (six months) and 80344 (year).

The Journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral Theses are to be published. The list came into effect in December 1, 2015.

EDITORIAL BOARD:

ANDREEV V.I., Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), DSc, Professor (Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia), *chairman*;
BAZHENOV V.A., Member of the National Academy of Educational Science of Ukraine, DSc, Professor (Kiev National University of Building and Architecture, Kiev, Ukraine),
BONDARENKO V.M., Member of the RAACS, DSc, Professor (NIISF RAACS, Moscow, Russia),
GOLIK V.I., Member of the Russian Academy of E Sciences, DSc, Professor (North-Caucasian State Technical University, Vladikavkaz, Russia),
REINHARD F.SACHSENHOFER, PhD, Professor (Montanuniversität Leoben, Austria),
IVANOV S.P., DSc, Professor (PGTU – VOLGATECH, Yoshkar-Ola),
KARPENKO N.I., Member of the RAACS, DSc, Professor (NIISF RAACS, Moscow, Russia),
KOLCHUNOV V.I., Member of the RAACS, DSc, Professor (South-West State Univ., Kursk, Russia),
GIUSEPPE MANDRONE, PhD, Ass. Prof. Engineering geology (University of Torino, Italy),
KRASIC SONJA, PhD (University of Nis, Nis, Serbia),
KRIVOSHAPKO S.N., DSc, Professor (RUDN University, Moscow, Russia),
LYAKHOVICH L.S., Member of the RAACS, DSc, Professor (Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB), Tomsk, Russia),
TRAVUSH V.I., Member of the RAACS, DSc, Professor (ENPI, Moscow, Russia),
YAKUPOV N.M., Corresponding Member of Russian Engineering Academy, DSc, Professor (Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences, Russia)

EDITORIAL STAFF:

DSc, Professor S.N. KRIVOSHAPKO (RUDN University, Moscow), editor-in-chief,
DSc, Professor V.N. Ivanov (RUDN University, Moscow) – assistant editor-in-chief,
DSc, Professor V.V. Vanin (National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute» (NTUU «KPI»), Kiev, Ukraine); DSc S.E. Lisichkin (Scientific Research Institute of Energy Structures (Open Joint-stock Company), Moscow); DSc, Professor E.M. Zveryaev (Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Science); DSc, Professor V.I. Obozov (Central Research Institute of Building Structures (TzNIISK im. V.V. Kucherenko, Moscow);
PhD, Assoc. Professor Bui Xuan Nam (Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam);
DSc, Professor V.P. Agapov (Moscow State University of Civil Engineering);
DSc, Professor R.S. Sanzharovskij (L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan);
I.A. Mamieva (RUDN University, Moscow) – *managing editor*,
E.A. Grin’ko – *editor of Internet site of the Journal in English*.

Official Internet site of the Journal: <http://stmj.rudn.ru>

Internet site of the Journal in English: <http://smjournal.narod.ru>

Corrector: E.M. Tupikova, computer making up: T.I. Karelina.

Address: RUDN University, 6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation, Engineering Academy, Department of Architecture and Building

Tel.: (495) 955-08-58; Факс: (495) 955-08-58

E.mail: sn_krivoshapko@mail.ru or i_mamieva@mail.ru

Founder: RUDN University, 6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation
Printing-house: IPK RUDN, 3, Ordjonikidze Str., Moscow, 117923, GSP-1, Russian Federation

© RUDN University (Peoples’ Friendship University of Russia), Moscow

© S.N. Krivoshapko, cover of the Journal (The exhibition of achievements of national economy, Moscow, Russia).

Contents,

No 6, 2017

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6

Geometrical investigations of middle surfaces of thin shells

Yakupov S.N., Nurullin R.G., Yakupov N.M. Parameterization of structure elements of complex geometry..... 4

Analysis of thin elastic shells

Shagivaleev K.F., Surnina E.K., Vasil'tsov S.V., Pshenov A.A. Calculation of the system of two closed cylindrical shells with intermediate support..... 10

Theory of elasticity

Kudryavtsev S.G., Buldakova J.M. Analysis of the stress state of three-layered anisotropic foundation..... 16

Analysis and design of building structures

Sanzharovskij R.S., Manchenko M.M. Errors of international standards on reinforced concrete and rules of the Eurocode..... 25

Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A. Experimental studies of deformation of reinforced concrete structures subjected torsion and bending..... 37

Bondarenko V.M., Pyatikrestovskiy K.P. Sustained force deforming of structured materials..... 45

Numerical methods of structures' analysis

Musayev V.K. Numerical simulation of transient stress waves in elastic half plane with a rectangular cavity while centering the vertical explosive impact..... 49

Analysis of underground structures

Razorenov Yu.I., Dzeranov B.V. Parameters of rock structures for underground ore mining..... 55

Buckling analysis

Ivanov S.P., Ivanov O.G., Ivanova A.S. The stability of plates under the action of shearing loads..... 68

Experimental researches

Sohounhloué A.Y. Jamik, Gbaguidi Aisse Gerard Leopold, Solbes Bernard, Galimard Philippe. Borassus aethiopicum mart of Benin used as reinforcement in concrete: Adhesion characterization..... 74

Геометрические исследования срединных поверхностей
тонких оболочек

УДК 539.3

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-4-9

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

С.Н. ЯКУПОВ, *к.т.н., с.н.с.*

Р.Г. НУРУЛЛИН, *к.т.н., с.н.с.*

Н.М. ЯКУПОВ, *д.т.н., г.н.с., зав. лаб.*

ИММ КазНЦ РАН: *tamas_86@mail.ru, nrg@mail.ru, yzsrr@kfti.knc.ru*

Экспериментальный подход параметризации трехмерных тел и тонкостенных элементов конструкций сложной геометрии. Алгоритм построения пространственной сети, а также определения координат, компонент метрического тензора и символов Кристоффеля. Эффективность моделирования элементов конструкций сложной геометрии сплайновым вариантом метода конечных элементов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: элементы конструкции, сложная геометрия, параметризация, экспериментальный подход, алгоритм построения сети, координаты, компоненты метрического тензора, символы Кристоффеля.

Введение. Тонкостенные конструкции, сочетающие в себе легкость с высокой прочностью, находят широкое применение в авиастроении, ракетостроении и кораблестроении, нефтехимии и т.д. [1, 2]. Они воспринимают большие нагрузки, работают в агрессивных средах и испытывают воздействие физических полей. Разрабатывают различные пленки и покрытия [3-5].

Среди тонкостенных конструкций особенно эффективными по своим характеристикам являются оболочки сложной геометрии [1, 2]. Наряду с малым весом они имеют высокие механические характеристики по жесткости и прочности. Варьируя форму поверхности, можно создавать легкие, высокопрочные и архитектурно выразительные конструкции. Эффективность применения оболочек сложной геометрии доказывается самой природой. Рождение конструктивных криволинейных форм сложной геометрии в строительном деле одно из крупных изобретений человечества, история которого уходит вглубь веков.

Различают оболочки сложной геометрии канонической формы, срединная поверхность которых может быть задана аналитическими формулами. Информация о таких поверхностях имеется, в частности, в энциклопедии С.Н. Кривошапка и В.Н. Иванова [2]. Однако срединную поверхность не всех оболочек можно описать аналитически – это оболочки неканонической геометрии, которые не менее функционально необходимы и эффективны по своим характеристикам жесткости и прочности.

Среди трудностей, связанных с более широким распространением тонкостенных конструкций сложной геометрии, можно отметить сложность технологии их изготовления, а также проблемы, возникающие при их моделировании. В ходе разрешения таких трудностей разработан безопасный способ формирования оболочек сложной геометрии из ориентированных полимерных материалов. На разработанные способы авторами получены патенты РФ на изобретения №2255864 и №2295446. Кроме того бурное развитие 3D-печати открывает широкие возможности в практическом применении сложных криволинейных форм.

Для более эффективного использования новых тонкостенных оболочек сложной геометрии необходимо научиться определять их физико-механические качества, оценивать напряженно-деформированное состояние и устойчивость

под действием различных нагрузок. В последней четверти XX века появились методы расчета тонкостенных оболочечных конструкций сложной геометрии. Интенсивно разрабатываются различные варианты метода конечных элементов. Среди них можно отметить сплайновый вариант метода конечных элементов, базирующийся на синтезе идеи параметризации поверхности сложной геометрии и метода конечных элементов [6-8]. При этом задача параметризации поверхности сложной геометрии вызывает определенные трудности. Для решения данной проблемы был разработан экспериментально-теоретический метод определения параметров срединной поверхности оболочки сложной геометрии (патент РФ на изобретение №2374697).

В процессе эксплуатации в элементах конструкций и сооружений возникают коррозионные и механические дефекты, происходят изменения механических свойств поверхностных слоев, а также геометрических и физических параметров по толщине оболочки [9, 10]. Для оценки концентрации напряжений в дефектных областях тонкостенных конструкций необходимо использовать трехмерные конечные элементы. Развитие современных методов расчета и рост возможностей вычислительной техники позволяют уточнять расчетные схемы и переходить от двумерных к трехмерным расчетным схемам. Все это позволяет более точно оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций и сооружений, в частности, с учетом различных локальных дефектов, переменности модуля упругости по толщине и других факторов и тем самым получить правильный прогноз о состоянии конструкции.

Начата разработка численного метода определения напряженно-деформированного состояния трехмерных объектов сложной геометрии на базе трехмерных элементов [11, 12]. При этом для задания геометрических параметров узловых точек конечных элементов необходимо выполнить параметризацию рассматриваемого элемента конструкции.

Экспериментальный способ параметризации элементов конструкций.

Рассматривается элемент конструкции сложной геометрии – тело с шестью криволинейными гранями с вершинами a, b, c, d, e, f, g, h (рис. 1). Изготавливают пространственный каркас $abcdefgh$ из криволинейных формообразующих ребер, совпадающих с контуром параметризуемого элемента. На криволинейных элементах $ab, bc, cd, da, ef, fg, gh, he, ea, fb, gc, hd$ делают метки в соответствии с заданным типом разбивки. Изготавливают трехмерную сеть из эластичных (например, резиновых) нитей 1, которые соединены в узлах 2 (рис. 2).

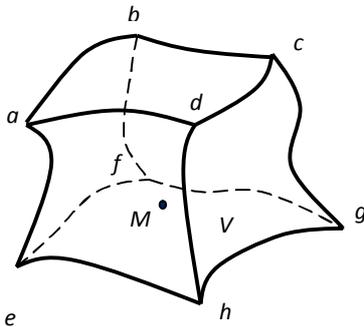


Рис. 1. Элемент конструкции

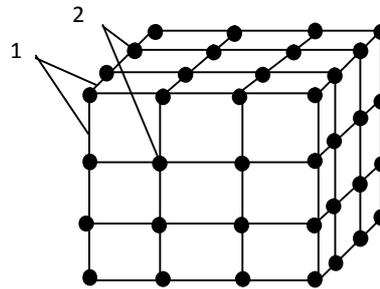


Рис. 2. Сеть из эластичных нитей

На каркас $abcdefgh$ натягивают пространственную сеть из эластичного материала. При этом внешние узловые точки при натяжении сети представляют собой грани формируемого тела, а внутренние узловые точки – расчетные точки тела. Каркас фиксируют относительно базисных оснований 3, 4 и 5 (с плоскостями, соответственно, α, β и γ) при помощи, например, опор 6, 7 и 8 (рис. 3).

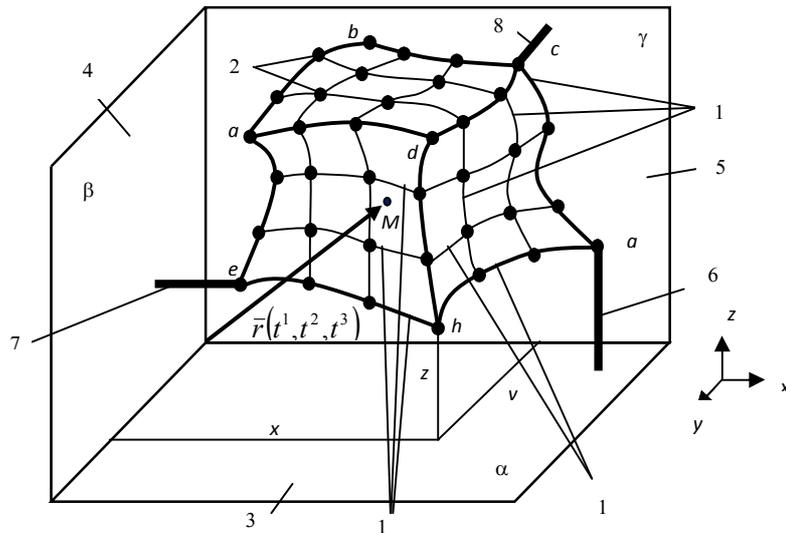


Рис. 3. Каркас с сетью на установке

На рисунках обозначены: x, y, z – координаты в декартовой системе; x_h, y_h, z_h – координаты точки h в декартовой системе; t^1, t^2 и t^3 – координаты (параметры) параметрического куба; V – объем, который занимает элемент конструкции; M – произвольная точка элемента конструкции (принадлежит объему V , включая поверхность тела); α, β, γ – ортогональные плоскости базисных оснований экспериментальной установки; $\vec{r}(t^1, t^2, t^3)$ – радиус-вектор произвольной точки M области V .

Параметрический куб, состоящий из ячеек в виде параллелепипедов, занимает объем V_ϕ в координатах t^1, t^2 и t^3 . В частном случае выбирают параметры t^1, t^2 и t^3 в пределах от 0 до 1. При этом M_ϕ – произвольная точка в параметрическом кубе объема V_ϕ , соответствует произвольной точке M элемента конструкции.

Далее производят замеры координат узловых точек деформированной сети относительно оснований 3, 4 и 5 по осям x, y и z при соответствующих параметрах t^1, t^2 и t^3 единичного куба с областью V_ϕ , то есть получают координаты $x(t^1, t^2, t^3); y(t^1, t^2, t^3); z(t^1, t^2, t^3)$ и определяют радиус-векторы в узлах сетки по формуле:

$$\vec{r} = x(t^1, t^2, t^3)\vec{i} + y(t^1, t^2, t^3)\vec{j} + z(t^1, t^2, t^3)\vec{k}, \quad (1)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные орты в декартовой системе координат.

Алгоритм построения пространственной сети и вычисления ее параметров осуществляется в следующей последовательности:

1. Дифференцируя выражение (1) по t^1, t^2 и t^3 , определяют координатные векторы \vec{r}_1, \vec{r}_2 и \vec{r}_3 :

$$\vec{r}_1 = \frac{\partial \vec{r}}{\partial t^1}, \quad \vec{r}_2 = \frac{\partial \vec{r}}{\partial t^2}, \quad \vec{r}_3 = \frac{\partial \vec{r}}{\partial t^3}. \quad (2)$$

Например, \vec{r}_1 определяется в виде:

$$\vec{r}_1 = \frac{x_{i+1,j,k} - x_{i-1,j,k}}{t_{i+1}^1 - t_{i-1}^1} \vec{i} + \frac{y_{i+1,j,k} - y_{i-1,j,k}}{t_{i+1}^1 - t_{i-1}^1} \vec{j} + \frac{z_{i+1,j,k} - z_{i-1,j,k}}{t_{i+1}^1 - t_{i-1}^1} \vec{k},$$

где i, j, k – идентификационные номера узловых точек по соответствующим направлениям координатных осей в трехмерном пространстве.

2. Определяют ковариантные компоненты первого основного метрического тензора $g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{22}, g_{23}, g_{31}, g_{32}, g_{33}$:

$$\begin{aligned} g_{11} &= \bar{r}_1 \bar{r}_1; \quad g_{12} = g_{21} = \bar{r}_1 \bar{r}_2; \quad g_{13} = g_{31} = \bar{r}_1 \bar{r}_3; \\ g_{22} &= \bar{r}_2 \bar{r}_2; \quad g_{23} = g_{32} = \bar{r}_2 \bar{r}_3; \quad g_{33} = \bar{r}_3 \bar{r}_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Например, g_{12} определяется в виде:

$$\begin{aligned} g_{12} &= \bar{r}_1 \bar{r}_2 = \left(\frac{x_{i+1,j,k} - x_{i-1,j,k}}{t_{i+1}^1 - t_{i-1}^1} \right) \left(\frac{x_{i,j+1,k} - x_{i,j-1,k}}{t_{j+1}^2 - t_{j-1}^2} \right) + \left(\frac{y_{i+1,j,k} - y_{i-1,j,k}}{t_{i+1}^1 - t_{i-1}^1} \right) \times \\ &\times \left(\frac{y_{i,j+1,k} - y_{i,j-1,k}}{t_{j+1}^2 - t_{j-1}^2} \right) + \left(\frac{z_{i+1,j,k} - z_{i-1,j,k}}{t_{i+1}^1 - t_{i-1}^1} \right) \left(\frac{z_{i,j+1,k} - z_{i,j-1,k}}{t_{j+1}^2 - t_{j-1}^2} \right) \end{aligned}$$

3. Аналогично определяют контравариантные компоненты первого основного метрического тензора $g^{11}, g^{12}, g^{13}, g^{21}, g^{22}, g^{23}, g^{31}, g^{32}, g^{33}$:

$$\begin{aligned} g^{11} &= \frac{g_{22}g_{33} - g_{23}^2}{g}; \quad g^{12} = g^{21} = -\frac{g_{12}g_{33} - g_{23}g_{13}}{g}; \quad g^{22} = \frac{g_{11}g_{33} - g_{13}^2}{g}, \\ g^{13} &= g^{31} = \frac{g_{12}g_{23} - g_{22}g_{13}}{g}; \quad g^{23} = g^{32} = -\frac{g_{11}g_{23} - g_{12}g_{13}}{g}; \quad g^{33} = \frac{g_{11}g_{22} - g_{12}^2}{g}. \end{aligned} \quad (4)$$

4. Далее определяют фундаментальный определитель g :

$$g = g_{33}(g_{11}g_{22} - g_{12}^2) - g_{32}(g_{11}g_{23} - g_{21}g_{13}) + g_{31}(g_{12}g_{23} - g_{13}g_{22}). \quad (5)$$

5. Дифференцируя ковариантные компоненты первого основного метрического тензора (3) по t^1, t^2 и t^3 , определяют их первые производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_{11}}{\partial t^1}, \frac{\partial g_{11}}{\partial t^2}, \frac{\partial g_{11}}{\partial t^3}, \frac{\partial g_{12}}{\partial t^1}, \frac{\partial g_{12}}{\partial t^2}, \frac{\partial g_{12}}{\partial t^3}, \frac{\partial g_{13}}{\partial t^1}, \frac{\partial g_{13}}{\partial t^2}, \frac{\partial g_{13}}{\partial t^3}, \\ \frac{\partial g_{22}}{\partial t^1}, \frac{\partial g_{22}}{\partial t^2}, \frac{\partial g_{22}}{\partial t^3}, \frac{\partial g_{23}}{\partial t^1}, \frac{\partial g_{23}}{\partial t^2}, \frac{\partial g_{23}}{\partial t^3}, \frac{\partial g_{33}}{\partial t^1}, \frac{\partial g_{33}}{\partial t^2}, \frac{\partial g_{33}}{\partial t^3}. \end{aligned} \quad (6)$$

6. Далее определяют символы Кристоффеля второго рода $\Gamma_{11}^1, \Gamma_{12}^1, \Gamma_{13}^1, \Gamma_{11}^2, \Gamma_{12}^2, \Gamma_{13}^2, \Gamma_{11}^3, \Gamma_{12}^3, \Gamma_{13}^3, \Gamma_{23}^1, \Gamma_{23}^2, \Gamma_{23}^3, \Gamma_{22}^1, \Gamma_{22}^2, \Gamma_{22}^3, \Gamma_{33}^1, \Gamma_{33}^2, \Gamma_{33}^3$ по общей формуле:

$$\Gamma_{jk}^i = \frac{1}{2} g^{it} \left(\frac{\partial g_{jt}}{\partial t^k} + \frac{\partial g_{kt}}{\partial t^j} - \frac{\partial g_{jk}}{\partial t^t} \right). \quad (7)$$

Например, Γ_{13}^1 определяется в виде:

$$\Gamma_{13}^1 = \frac{1}{2} g^{11} \left(\frac{\partial g_{11}}{\partial t^3} + \frac{\partial g_{31}}{\partial t^1} - \frac{\partial g_{13}}{\partial t^1} \right) + \frac{1}{2} g^{12} \left(\frac{\partial g_{12}}{\partial t^3} + \frac{\partial g_{32}}{\partial t^1} - \frac{\partial g_{13}}{\partial t^2} \right) + \frac{1}{2} g^{13} \left(\frac{\partial g_{13}}{\partial t^3} + \frac{\partial g_{33}}{\partial t^1} - \frac{\partial g_{13}}{\partial t^3} \right).$$

Таким образом, для элемента конструкции определяют по параметрам t^1, t^2 и t^3 : значения координат $x(t^1, t^2, t^3), y(t^1, t^2, t^3), z(t^1, t^2, t^3)$; ковариантные $g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{22}, g_{23}, g_{31}, g_{32}, g_{33}$ и контравариантные $g^{11}, g^{12}, g^{13}, g^{21}, g^{22}, g^{23}, g^{31}, g^{32}, g^{33}$ компоненты метрического тензора; определитель g ; символы Кристоффеля $\Gamma_{11}^1, \Gamma_{12}^1, \Gamma_{13}^1, \Gamma_{11}^2, \Gamma_{12}^2, \Gamma_{13}^2, \Gamma_{11}^3, \Gamma_{12}^3, \Gamma_{13}^3, \Gamma_{23}^1, \Gamma_{23}^2, \Gamma_{23}^3, \Gamma_{22}^1, \Gamma_{22}^2, \Gamma_{22}^3, \Gamma_{33}^1, \Gamma_{33}^2, \Gamma_{33}^3$.

При необходимости осуществляют сглаживание полученных результатов в процессе их обработки. В общем случае, вместо параметрического куба используют параметрический параллелепипед.

Заключение. Разработан экспериментальный подход параметризации трехмерных тел сложной геометрии, позволяющий также выполнить параметризацию тонкостенных элементов конструкции. Подход позволяет повысить

эффективность моделирования элементов конструкции сложной геометрии сплайновым вариантом метода конечных элементов.

© Якупов С.Н., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Якупов Н.М., Галимов Ш.К., Хисматуллин Н.И. От каменных глыб к тонкостенным конструкциям. Казань: Изд-во "SOS", 2001. 96 с.
2. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 752 p.
3. Yakupov N.M., Yakupov S.N. Definition of mechanical characteristics of films with the pores, nano-inclusions and nanocoatings // Abstracts. The second Nanotechnology International Forum. M.: Rusnanotech, 2009. P. 344—346.
4. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances // Surface & Coatings Technology 258. 2014. P. 17—37.
5. Yakupov S.N., Yakupov N.M. Thin-layer films and coatings // Journal of Physics: Conference series 857 (2017) 012056.
6. Якупов Н.М. Об одном методе расчета оболочек сложной геометрии // Исследования по теории оболочек. Казань: КФТИ КФАН СССР, 1984. Вып.17. Часть II. С.4—17.
7. Корнишин М.С., Якупов Н.М. Сплайновый вариант метода конечных элементов для расчета оболочек сложной геометрии // ПМ. 1987. Т.23. № 3. С. 38—44.
8. Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Akhmadiev F.G., Kiyamov I.H., Yakupov S.N. Simulation of shells of complex geometry // 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Moscow, June 27-29, 2012. 0139 paper_long.pdf.
9. Yakupov N.M., Nurullin R.G., Nurgaliyev A.R., Yakupov S.N. Maintenance of safety of water-cooling tower constructions // 19th European Conf. on Fracture: Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety. Kazan, Russia, 26-31 August, 2012. 211_proceeding.pdf
10. Yakupov N.M., Yakupov S.N., Rynkovskaya M.I. Some problems of corrosion and methods of protection // Abstract Book. 2nd International Congress on Technology - Engineering & Science. Malaysia. July 28-29. 2016. P. 143—145.
11. Якупов Н.М., Киямов Х.Г. и др. Методы и подходы исследования напряженно-деформированного состояния конструкций сложной геометрии // Строительство. Изв. ВУЗов. № 8 (524), 2002. С. 14—18.
12. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Киямов И.Х. Моделирование элементов конструкций сложной геометрии трехмерными конечными элементами // Механика композиционных материалов и конструкций. 2011. № 1. С. 145—154.

Поступила в редакцию 12 июня 2017 г. Прошла рецензирование 2 октября 2017 г.

Принята к публикации 16 октября 2017 г.

Об авторах:

ЯКУПОВ САМАТ НУХОВИЧ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт Механики и Машиностроения Казанского научного центра Российской Академии наук, Казань. Сфера научных интересов – механика тонкостенных конструкций, механика пленок и мембран, композиционные структуры, адгезия, коррозионного износа, tamas_86@mail.ru

НУРУЛЛИН РИМНАТ ГАЛЕЕВИЧ - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт Механики и Машиностроения Казанского научного центра Российской Академии наук, Казань. Сфера научных интересов – механика тонкостенных конструкций, механика пленок и мембран, устойчивость объектов, безопасность жизнедеятельности, nrg@mail.ru

ЯКУПОВ НУХ МАХМУДОВИЧ – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской инженерной академии, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Нелинейной механики оболочек, Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской Академии наук, Казань. Сфера научных интересов – механика тонкостенных конструкций сложной геометрии; пленки и мембраны, коррозионный износ, метод конечных элементов, строительные и машиностроительные конструкции, yzsrr@kfti.knc.ru

Для цитирования: Якупов С.Н., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М. Параметризация элементов конструкций сложной геометрии// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 4—9. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-4-9.

References

1. Yakupov, N.M., Galimov, Sh.K., Khismatullin, N.I. (2001). *Ot Kamennyh Glyb k Tonkostennym Konstrukciyam* [From Stones to Thin-walled Structures]. Kazan': Izd-vo "SOS". 96 p.
2. Krivoschapko, S.N., Ivanov, V.N. (2015). *Encyclopedia of Analytical Surfaces*. Springer International Publishing Switzerland. 752 p.
3. Yakupov, N.M., Yakupov, S.N. (2009). Definition of mechanical characteristics of films with the pores, nanoinclusions and nanocoatings. Abstracts: *The second Nanotechnology International Forum*. Moscow: Rusnanotech. 344—346.
4. Montemor, M.F. (2014). Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surface & Coatings Technology*, 258. 17—37.
5. Yakupov, S.N., Yakupov, N.M. (2017). Thin-layer films and coatings. *Journal of Physics: Conference series* 857 012056.
6. Yakupov, N.M. (1984). Ob odnom metode rascheta obolochek slozhnoj geometrii [On one method of analysis of shells of complex geometry]. *Issledovaniya po Teorii Obolochek*. Trudy seminara. Kazan': KFTI KFAN SSSR, Iss. 17, Part II. 4—17.
7. Kornishin, M.S., Yakupov N.M. (1987). Splajnovyj variant metoda konechnyh ehlementov dlya rascheta obolochek slozhnoj geometrii. *Prikladnaya Mekhanika*, Vol. 23, No 3. 38—44.
8. Yakupov, N.M., Kiyamov, H.G., Akhmediyev, F.G., Kiyamov, I.H., Yakupov, S.N. (2012). Simulation of shells of complex geometry. *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Moscow, June 27-29, 2012, 0139 paper_long.pdf.
9. Yakupov, N.M., Nurullin, R.G., Nurgaliyev, A.R., Yakupov, S.N. (2012). Maintenance of safety of water-cooling tower constructions. *19th European Conference on Fracture: Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety*. Kazan, Russia, 26-31 August, 2012. 211_proceeding.pdf
10. Yakupov, N.M., Yakupov, S.N., Rynkovskay, M.I. (2016). Some problems of corrosion and methods of protection. Abstract Book: *2nd International Congress On Technology - Engineering & Science*. Malaysia. July 28-29. 2016. 143—145.
11. Yakupov, N.M., Kiyamov, H.G. et al (2002). Metody i podhody issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstrukcij slozhnoj geometrii [Methods and approaches of investigation of stress-strain state of a structure of complex geometry]. *Stroitel'stvo. Izv. VUZov*, №8 (524). 14—18.
12. Yakupov, N.M., Kiyamov, H.G., Yakupov, S.N., Kiyamov, I.H. (2011). Modelirovanie ehlementov konstrukcij slozhnoj geometrii trekhmernymi konechnymi ehlementami [The modelling of elements of structures of complex geometry by 3D finite elements]. *Mekhanika Kompozitsionnykh Materialov i Konstrukcij*, No 1. 145—154.

PARAMETERIZATION OF STRUCTURE ELEMENTS OF COMPLEX GEOMETRY

S.N. YAKUPOV, R.G. NURULLIN, N.M. YAKUPOV

Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences

Experimental approach of parametrization of three-dimensional bodies and thin-walled elements of structures of complex geometry is considered. Algorithm for constructing a spatial network, as well as determining the coordinates, components of the metric tensor and Christoffel symbols are given. Efficiency of modeling elements of complex geometry by a spline version of the finite element method is discussed.

KEYWORDS: elements of construction, complex geometry, parametrization, experimental approach, network construction algorithm, coordinates, metric tensor component, Christoffel symbols.

Article history: Received: June 12, 2017. Revised: October 2, 2017. Accepted: October 16, 2017.

About the authors:

YAKUPOV SAMAT NUKHOVICH, candidate of technical Sciences, Institute of Mechanics and Engineering (IME), Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences. Sphere of scientific interests: mechanics of thin-walled structures, mechanics of films and membranes, composite structures, adhesion, corrosion, Kazan, tamas_86@mail.ru

NURULLIN RINNAT GALEEVICH, candidate of technical Sciences, IME, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences. Sphere of scientific interests: mechanics of thin-walled structures, mechanics of films and membranes, Stability of objects, life safety, Kazan, nrg@mail.ru

YAKUPOV NUH MAKHMUDOVICH, doctor of technical Sciences, professor, member- correspondent of the Russian Academy of engineering, chief researcher, head of laboratory of Nonlinear mechanics of shells, IME, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences. Sphere of scientific interests: mechanics of thin-walled structures of complex geometry; films and membranes, corrosion, finite element method, construction and engineering design, Kazan, yzsrr@kfti.knc.ru

For citation: Yakupov S.N., Nurullin R.G., Yakupov N.M. (2017) Parameterization of structure elements of complex geometry. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Building*. No 6. 4—9. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-4-9.

Расчет тонких упругих оболочек

УДК 624.04:539.3

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-10-15

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ

К.Ф. ШАГИВАЛЛЕЕВ, канд. техн. наук, доц. *

Е.К. СУРНИНА, канд. техн. наук, доц. *

С.В. ВАСИЛЬЦОВ, канд. техн. наук, ГИП**

А.А. ПШЕНОВ, инженер***

* Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,

** ООО «Нефтегазинжиниринг»,

*** ООО «Экспресс-проект»

Рабочий адрес: 410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Рабочий тел. (8-452) 99-89-56. E-mail: Vasiltsov_Sergei@mail.ru

Рассмотрена пространственная система из двух замкнутых цилиндрических оболочек, имеющих на одном конце жесткое закрепление а на другом- свободный конец. Оболочки расположены на некотором расстоянии друг от друга и соединены между собой одной промежуточной связью. Одна из оболочек находится под действием нагрузки, сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль одной образующей. Для расчета пространственной системы используется метод сил. Таким образом, расчет пространственной системы сведен к расчету отдельных замкнутых цилиндрических оболочек. Из условия равенства радиальных перемещений в месте контакта оболочек было определено реактивное давление в промежуточной связи. Исследуется, как изменяется величина реактивного давления в связи в зависимости от местоположения промежуточной связи и геометрических параметров оболочек. Зная величину реактивного давления можно определить напряженно-деформированное состояние каждой оболочки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оболочка, система из двух оболочек, геометрические параметры, статическая нагрузка, метод сил, перемещение, тригонометрический ряд.

Пространственные системы из замкнутых цилиндрических оболочек находят широкое применение в современной технике. Различные условия нагружения и эксплуатации замкнутых цилиндрических оболочек создают определенные трудности при расчете подобных систем. Поэтому проблема создания точных и эффективных методов расчета пространственных систем, доступных инженеру □ проектировщику, продолжает сохранять свою актуальность.

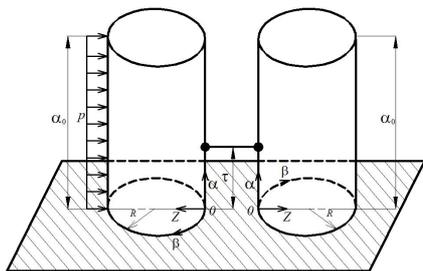


Рис.1

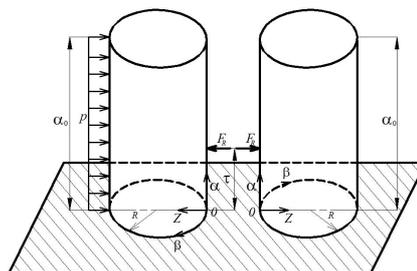


Рис.2

Рассмотрена пространственная система из двух замкнутых цилиндрических оболочек, имеющих на одном конце жесткое закрепление, а на другом – свободный конец. Оболочки расположены на некотором расстоянии друг от друга и соединены между собой одной промежуточной (жесткой) связью. Одна из оболочек находится под действием нагрузки p , сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль одной образующей (рис. 1). Для каждой оболочки принята своя система координат (рис. 1).

Для расчета пространственной системы применим метод сил. Основную систему выберем, разрезая горизонтальный стержень, заменяя его действием реактивной силы F_R (рис. 2). Таким образом, расчет пространственной системы сведен к расчету отдельных замкнутых цилиндрических оболочек.

Неизвестную реактивную силу F_R находим из условия сопряжения оболочек. В точке контакта оболочек радиальные перемещения оболочек равны.

В качестве примера рассмотрена пространственная система из двух замкнутых цилиндрических оболочек с одинаковыми геометрическими параметрами: длина оболочек $L = 30$ м, радиус $R = 3$ м, $\alpha_0 = L/R = 10$, толщина стенки $h = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Одна из оболочек нагружена радиальной нагрузкой p , сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль образующей $\beta = \pi$.

Используя аналитические выражения для определения перемещений, усилий и моментов при действии различных радиальных нагрузок, приведенные в работе [1], был выполнен расчет пространственной системы.

Были определены радиальные перемещения в первой и второй оболочках в точке контакта оболочек. Рассмотрим случай, когда промежуточная связь находится на свободном конце [2].

Радиальные перемещения в первой оболочке (в точке контакта оболочек) от действия нагрузки p : $w_{1p}(\alpha_0; 0) = -4578,6 p / E$.

Радиальные перемещения в первой оболочке (в точке контакта оболочек) от действия неизвестной сосредоточенной силы F_R :

$$w_{1F_R}(\alpha_0; 0) = 5445,1622 \frac{F_R}{E R}.$$

Радиальные перемещения во второй оболочке (в точке контакта оболочек) от действия неизвестной сосредоточенной силы F_R :

$$w_{2F_R}(\alpha_0; 0) = 5445,1622 \frac{F_R}{E R}.$$

При определении радиальных перемещений в оболочках от действия внешней нагрузки p , сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль образующей, и неизвестной реактивной силы F_R нагрузки раскладывались в тригонометрические ряды по переменной β и удерживалось от внешней нагрузки 100 членов ряда, от действия сосредоточенной силы – 300 членов тригонометрического ряда.

Из условия, что в точке контакта оболочек радиальные перемещения оболочек равны, была определена неизвестная реактивная сила F_R :

$$\begin{aligned} w_{1F} + w_{1F_R} &= -w_{2F_R}; \\ -4578,6 \frac{p}{E} + 5445,1622 \frac{F_R}{E R} &= -5445,1622 \frac{F_R}{E R}, \end{aligned} \quad (1)$$

тогда

$$F_R = 0,420428 p R. \quad (2)$$

Было проведено исследование, как изменяется величина реактивного давления при изменении координаты расположения промежуточной связи (12 точек). Результаты расчета приведены в таблице 1.

Значения, приведенные в табл. 1, необходимо умножить на $10^{-4} p R$.

Рассмотрим, как изменяется величина реактивного давления при изменении геометрических параметров одной из оболочек.

Параметры первой оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_1 = 3$ м, $\alpha_0 = L/R_1 = 10$, толщина стенки $h_1 = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Параметры второй оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_2 = 6$ м, $\alpha_0 = L/R_2 = 5$, толщина стенки $h_2 = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис. 3, 4).

Таблица 1

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
106	486	1060	1844	2875	4070	5361	6407	7010	7029	6381	4205

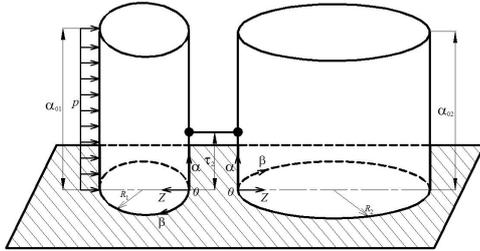


Рис.3

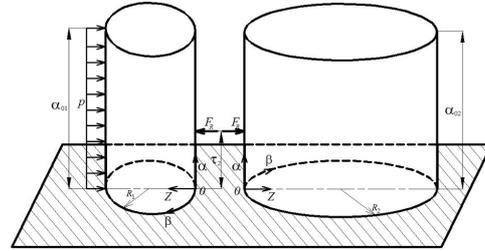


Рис.4

Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
128	592	1300	2276	3562	5034	6628	7898	8630	8665	7889	5188
64	296	650	1137	1781	2517	3314	3949	4315	4332	3945	2593

Значения, приведенные в табл. 2, необходимо умножить в третьей строке на $10^{-4}pR_1$, в четвертой строке на $10^{-4}pR_2$.

Другой пример: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_1 = 6$ м, $\alpha_0 = L/R_1 = 5$, толщина стенки $h_1 = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Параметры второй оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_2 = 3$ м, $\alpha_0 = L/R_2 = 10$, толщина стенки $h_2 = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис. 5, 6).

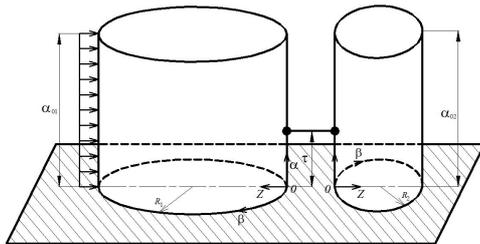


Рис.5

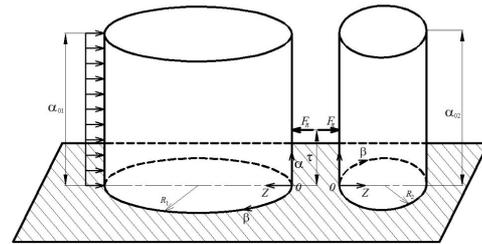


Рис.6

Таблица 3

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
337	828	1397	1991	2553	3017	3437	3667	3694	3492	3042	1936
674	1655	2794	3983	5107	6035	6874	7333	7388	6984	6083	3871

Результаты расчета приведены в таблице 3.

Значения, приведенные в табл. 3, необходимо умножить в третьей строке на $-10^{-4}pR_1$, в четвертой строке на $-10^{-4}pR_2$.

Теперь рассмотрим случай, когда изменены геометрические параметры обеих оболочек: длина оболочек $L = 30$ м, радиус $R = 6$ м, $\alpha_0 = L/R = 5$, толщина стенки $h = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис.7, 8).

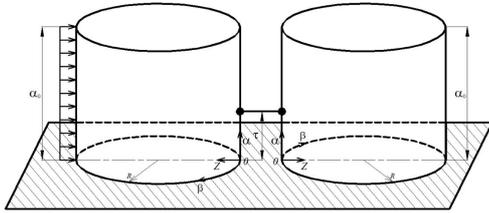


Рис.7

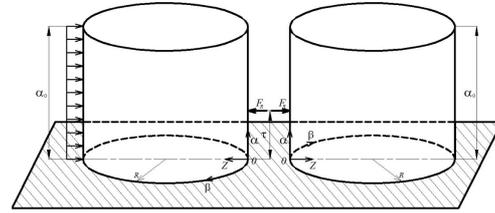


Рис.8

Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
427	1058	1805	2600	3355	3953	4501	4778	4804	4551	3983	2526

Значения, приведенные в табл. 4, необходимо умножить на $-10^{-4}pR$.

Исследуем, как изменяется величина реактивного давления в промежуточной связи, если жесткость второй оболочки равна бесконечности (рис.9, 10).

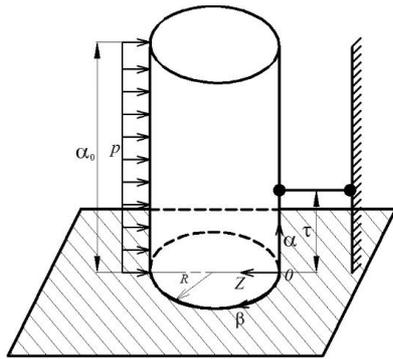


Рис.9

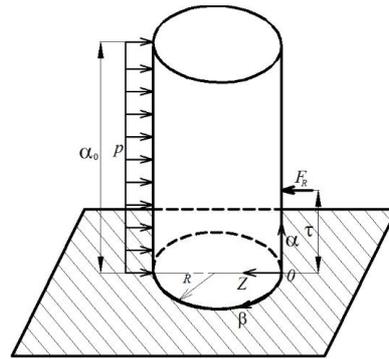


Рис.10

Сначала рассмотрим оболочку со следующими параметрами: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_1 = 3$ м, $\alpha_0 = L/R_1 = 10$, толщина стенки $h_1 = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Результаты расчета приведены в таблице 5.

Таблица 5

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
212	972	2120	3688	5751	8141	10722	12815	14021	14058	12761	8410

Значения, приведенные в табл. 5, необходимо умножить на $10^{-4}pR$.

Изменим параметры оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_2 = 6$ м, $\alpha_0 = L/R_2 = 5$, толщина стенки $h_2 = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис.11,12).

Результаты расчета приведены в таблице 6. Значения, приведенные в табл. 6, необходимо умножить на $10^{-4}pR$.

Зная F_R , можно, используя выражения, приведенные в работе [1], определить напряженно деформируемое состояние в каждой оболочке.

Используя предлагаемый подход, можно рассчитать пространственную систему, состоящую из любого количества замкнутых цилиндрических оболочек,

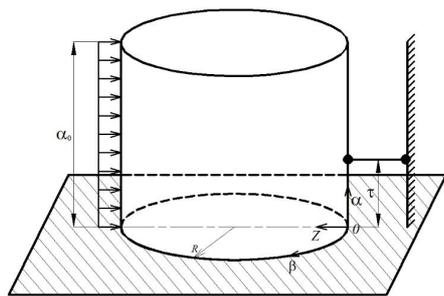


Рис. 11

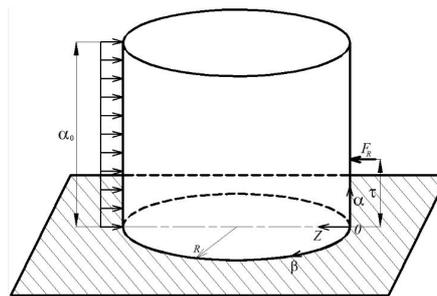


Рис. 12

Таблица 6

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
853	2115	3611	5200	6710	7906	9001	9539	9608	9102	7967	5051

при действии различных нагрузок, при разных геометрических параметрах оболочек. Результаты работы могут быть использованы инженерами - проектировщиками, научными работниками, аспирантами и студентами.

© Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Васильцов С.В., Пшенов А.А. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Шагивалеев К.Ф. Расчет замкнутой цилиндрической оболочки на локальные и сосредоточенные нагрузки // Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2011. 316 с.

2. Шагивалеев К. Ф. Расчет системы из двух замкнутых цилиндрических оболочек / К.Ф. Шагивалеев, Е.К. Сурнина, А.А. Пшенов // III Международная научно - практическая конференция «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе»: сб. научн. трудов, том 2. – Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2015. – С. 41—45.

Поступила в редакцию 3 июня 2017 г. Прошла рецензирование 3 сентября 2017 г.

Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

ШАГИВАЛЕЕВ КАМИЛЬ ФАТЫХОВИЧ, кандидат технических наук, доцент. Окончил Саратовский политехнический институт в 1965 г. Окончил аспирантуру в Саратовском государственном техническом университете (1968), защитил кандидатскую диссертацию (1970), в 1976 г. присвоено ученое звание доцента. С 1968 г. и по настоящее время работает в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина на кафедре "Теория сооружений и строительных конструкций". Научное направление: расчет отдельных замкнутых цилиндрических оболочек при действии различных нагрузок и пространственных систем, в состав которых входят замкнутые цилиндрические оболочки. По результатам работы опубликовано 5 монографий, более 100 статей.

СУРНИНА ЕЛЕНА КАМИЛЕВНА, кандидат технических наук, доцент. Окончила Саратовский государственный университет в 1992 и Саратовский государственный технический университет в 2005 г. Защитила кандидатскую диссертацию (1996), в 2006 г. присвоено ученое звание доцента. В настоящее время работает в должности доцента в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина на кафедре "Транспортное строительство". Научное направление: расчет как отдельных замкнутых цилиндрических оболочек при действии различных нагрузок так и пространственных систем, в состав которых входят замкнутые цилиндрические оболочки. По результатам работы опубликовано 1 монография, 43 статьи.

ВАСИЛЬЦОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, кандидат технических наук. В 2009 г. окончил Саратовский государственный технический университет по специальности «Промышленное и гражданское строительство», присвоена квалификация «инженер». Окончил магистратуру того же университета по направлению «Строительство» (2011), а в 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию. В настоящее время работает в должности главного инженера проектов в ООО «Нефтегазинжиниринг», Саратов. Научное направление: расчет как отдельных замкнутых цилиндрических оболочек при действии различных нагрузок, так и пространственных систем, в состав которых входят цилиндрические оболочки, а также расчет замкнутых круговых колец при действии различных нагрузок. По результатам работы опубликовано 23 статьи.

ПШЕНОВ АНТОН АНДРЕЕВИЧ, магистр. В 2014 г. окончил Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, присвоена квалификация «бакалавр», в 2016 г. окончил магистратуру того же университета по направлению «Строительство». В настоящее время работает в должности инженера в ООО «Экспресс-проект». Научное направление: расчет цилиндрических оболочек на действие различных нагрузок, а также пространственных систем, в состав которых входят замкнутые цилиндрические оболочки. По результатам работы опубликовано 6 статей.

Для цитирования:

Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Васильцов С.В., Пшенов А.А. Расчет системы из двух замкнутых цилиндрических оболочек с промежуточной опорой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 10—15. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-10-15.

References

1. Shagivaleev, K.F. (2011). *Calculation of the Closed Cylindrical Cover on the Local and Concentrated Loads*. Saratov: Sarat. State Technical. Univ. 316 p.
2. Shagivaleev, K. F., Surnina, E.K., Pshenov, A.A. (2015). Calculation of a system of two closed cylindrical shells. *III International Scientific and Practical Conference "Resource Energy-Efficient Technologies in the Building Complex"*: Proc. of scientific works, Vol. 2, Sarat. State. Tech. Univ., Saratov, 2015. 41—45.

CALCULATION OF THE SYSTEM OF TWO CLOSED CYLINDRICAL SHELLS WITH INTERMEDIATE SUPPORT

K.F. SHAGIVALEEV*, E.K. SURNINA*, S.V. VASILTSOV**, A.A. PSHENOV***

* The Saratov State Technical University of Gagarin Yu.A.

** LLC «Neftegaseengineering», *** LLC «Express project»,

Address: 77, Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Tel.: (8452) 99-89-56; E-mail: Vasiltsov_Sergei@mail.ru

A spatial system of two closed cylindrical shells is considered, having rigid fixation at one end and a free end at the other. Shells are located at some distance from each other and are interconnected by one intermediate link. One of the shells is under the action of a load, concentrated in the annular direction and uniformly distributed along one generatrix. To calculate the spatial system, the force method is used. Thus, the calculation of the spatial system is reduced to the calculation of individual closed cylindrical shells. From the condition of equality of radial displacements at the point of contact of the shells, the reactive pressure in the intermediate bond was determined. The magnitude of the reactive pressure in the bond varies depending on the location of the intermediate bond and the geometric parameters of the shells. Knowing the magnitude of the reactive pressure, one can determine the stress-strain state of each shell.

Keywords: shell, system from two shells, geometric parameters, static load, method of forces, displacements, trigonometric series.

Article history: Received: June 3, 2017. Revised: September 3, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors: SHAGIVALEEV KAMIL FATYKHOVICH, PhD, Associate Professor. graduated from the Saratov Polytechnic Institute (1965), defended his thesis (1970). From 1968, he works at Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. on the chair "Theory of Structures and Building Structures". His scientific interests: the calculation of cylindrical shells and spatial systems designed from closed cylindrical shells. 5 monographs and 100 articles have been published by him.

SURNINA ELENA KAMELEVNA, PhD, Associate Professor, graduated from Saratov State University (1992) and Saratov State Technical University (2005), defended her thesis (1996). She is an assistant professor at Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. The scientific direction is the calculation of cylindrical shells and spatial systems made of closed cylindrical shells. According to the results of her work, she published 1 monograph, 43 articles.

VASILTSOV SERGEY VIKTOROVICH, PhD, graduated from the Saratov State Technical University (2011), defended his thesis (2016). He works as a Chief Project Engineer at LLC "Neftegazinhiring", Saratov. His scientific directions: the calculation of cylindrical shells and shell spatial systems, and the calculation of closed circular rings under the action of various loads. 23 articles were published.

PSHENOV ANTON ANDREEVICH graduated from the Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. (2016). He works as an engineer in LLC Express-project. The scientific direction is the calculation of closed cylindrical shells and shell spatial systems. 6 articles were published by him.

For citation: Shagivaleev K.F., Surnina E.K., Vasiltsov S.V., Pshenov A.A. (2017) Calculation of the system of two closed cylindrical shells with intermediate support. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 10—15. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-10-15.

Теория упругости

УДК 539.3

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-16-24

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХСЛОЙНОГО АНИЗОТРОПНОГО ОСНОВАНИЯ

С.Г. КУДРЯВЦЕВ, канд. техн. наук, доцент

Ю.М. БУЛДАКОВА, ст. преподаватель

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, дом 3

KudryavcevSG@volgatech.net

Представлены результаты расчетов на основе уравнений плоской задачи теории упругости по определению напряжений в трехслойном анизотропном основании под действием статической нормальной поверхностной нагрузки. Рассматривается вариант полного сцепления между слоями.

Функции напряжений в каждом слое записываются через нормальные и касательные усилия, возникающие на линии контакта полосы и полуплоскости. Контактные усилия между полосой и полуплоскостью определяются из системы двух уравнений и условий на поверхности основания. В результате функции напряжений в каждом слое записываются через поверхностную нагрузку в виде несобственных интегралов.

Проводится анализ напряженного состояния по модели трехслойного изотропного основания в зависимости от упругих характеристик материала слоев. Показано влияние анизотропии материала слоев в трехслойном грунтовом массиве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: напряжение, анизотропия, упругость, полоса, полуплоскость.

Теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния в многослойных основаниях имеют практическое приложение в механике грунтов [1], при расчете дорожных и аэродромных покрытий [2]. Из ранних исследований, связанных с расчетом слоистых изотропных оснований под действием поверхностной нагрузки, отметим работы [3–5]. Данный вопрос рассматривался также в статьях [6–10]. Применение изотропной модели при расчете многослойных оснований, когда материал слоев имеет ярко выраженную анизотропию приводит, как показано, например, в публикациях [11–14], к искажению действительной картины работы основания.

В работе представлены результаты расчетов по определению напряжений в трехслойном анизотропном основании при условии полного сцепления между слоями, под действием статической поверхностной нагрузки, и проводится их сопоставление с расчетом по модели трехслойного изотропного основания.

Рассмотрим трехкомпонентную упругую среду, состоящую из двух полос с плоскопараллельными границами бесконечной длины и полуплоскости (рис.1). Материал каждого слоя анизотропный с заданными упругими характеристиками. Для полос упругие характеристики материала, высота, напряжения, перемещения обозначены нижним индексом k ($k = 1, 2$). Нумерация принята снизу вверх. Перемещения, напряжения, упругие характеристики материала полуплоскости обозначим чертой сверху. Каждый слой отнесем к местной декартовой системе координат. Оси абсцисс всех систем координат сонаправлены. Оси ординат совпадают и направлены вглубь слоев перпендикулярно границе раздела. Положительные направления напряжений и перемещений для полос и полуплоскости показаны на рисунке.

При полном сцеплении между слоями на линии соединения полосы и полуплоскости выполняются следующие условия контакта:

$$\begin{aligned} \sigma_{y1}(x_1, y_1 = 0) = \bar{\sigma}_y(\bar{x}, \bar{y} = 0); \quad \tau_{xy1}(x_1, y_1 = 0) = \bar{\tau}_{xy}(\bar{x}, \bar{y} = 0); \\ u_1(x_1, y_1 = 0) = \bar{u}(\bar{x}, \bar{y} = 0); \quad -v_1(x_1, y_1 = 0) = \bar{v}(\bar{x}, \bar{y} = 0); \end{aligned} \quad (1)$$

на линии взаимодействия полос условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{y1}(x_1, y_1 = h_1) = \sigma_{y2}(x_2, y_2 = 0); \quad \tau_{xy1}(x_1, y_1 = h_1) = \tau_{xy2}(x_2, y_2 = 0); \\ u_1(x_1, y_1 = h_1) = u_2(x_2, y_2 = 0); \quad v_1(x_1, y_1 = h_1) = v_2(x_2, y_2 = 0). \end{aligned} \quad (2)$$

На поверхности основания заданы граничные условия первого рода:

$$\sigma_{y2}(x_2, y_2 = h_2) = q(x); \quad \tau_{xy2}(x_2, y_2 = h_2) = \tau(x). \quad (3)$$

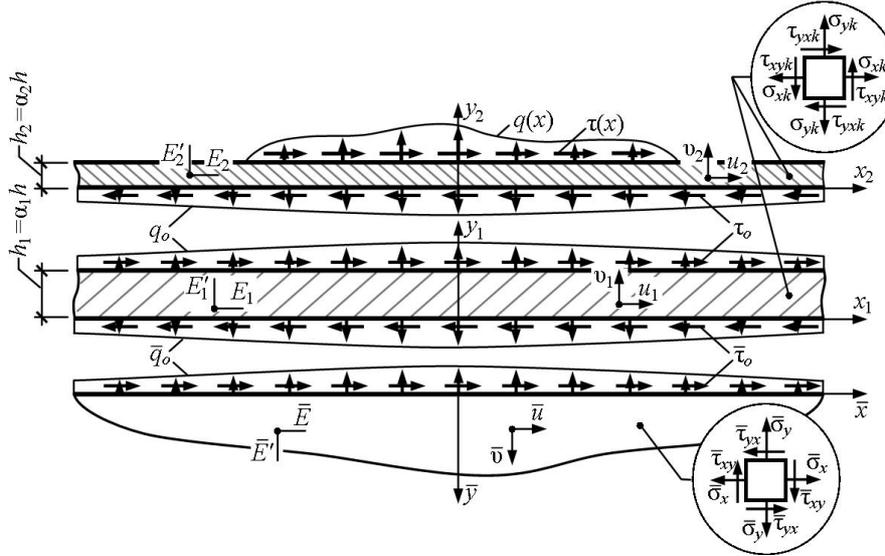


Рис.1. Схема взаимодействия слоев основания

Задача решалась на основе метода, изложенного в [15]. Используя уравнения для определения напряжений и перемещений в полосе и полуплоскости, приведенные в [15–16], и условия (1)–(2), функции перемещений и напряжений в каждом слое запишем через нормальные и касательные усилия, возникающие на линии контакта полосы и полуплоскости. Полагая, что существует интегральное преобразование Фурье от функций $q(x)$ и $\tau(x)$, выразим из условий (3) контактные усилия между полосой и полуплоскостью через поверхностную нагрузку. В результате функции перемещений и напряжений в каждом слое будут записаны через поверхностную нагрузку в виде несобственных интегралов, которые, ввиду их громоздкой структуры, не приводятся.

Приведем результаты расчетов по определению напряжений на конкретном примере. Пусть на участке длиной $2a$ действует перпендикулярно плоскости основания распределенная нагрузка постоянной интенсивности q (рис.2). Полагаем, что слои выполнены из разных изотропных материалов (коэффициент Пуассона $\bar{\nu} = \nu_k = 0,25$), высота полос одинакова ($\alpha_k = 1$), отношение $h/a = 2$. Расчеты выполнены для плоского деформированного состояния.

При проведении расчетов вводим безразмерные параметры для полос:

$$\tilde{\sigma}_{yk} = \frac{\sigma_{yk}\pi}{q}, \quad \tilde{\sigma}_{xk} = \frac{\sigma_{xk}\pi}{q}, \quad \tilde{\tau}_{xyk} = \frac{\tau_{xyk}\pi}{q}, \quad \tilde{x}_k = \frac{x_k}{h}, \quad \tilde{y}_k = \frac{y_k}{h}, \quad \alpha_k = \frac{h_k}{h},$$

и полуплоскости:

$$\tilde{\bar{\sigma}}_y = \frac{\bar{\sigma}_y\pi}{q}, \quad \tilde{\bar{\sigma}}_x = \frac{\bar{\sigma}_x\pi}{q}, \quad \tilde{\bar{\tau}}_{xyk} = \frac{\bar{\tau}_{xyk}\pi}{q}, \quad \tilde{\bar{x}} = \frac{\bar{x}}{h}, \quad \tilde{\bar{y}} = \frac{\bar{y}}{h},$$

где h некоторый характерный параметр высоты полосы.

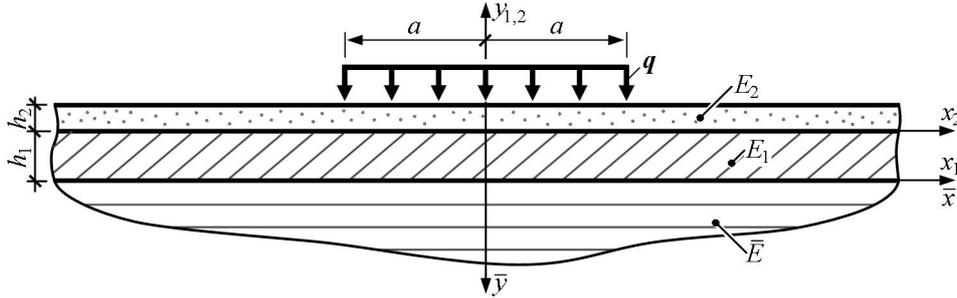


Рис. 2. Схема нагружения трехслойного изотропного основания

Параметры напряжений для полос и полуплоскости, безразмерные параметры координат далее будем обозначать одинаково: $\tilde{\sigma}_x, \tilde{\sigma}_y, \tilde{\tau}_{xy}, \tilde{x}$.

Сравнение данных в таблице 1, где приведены максимальные значения $\tilde{\sigma}_y$, показывает, что увеличение модуля упругости в вышележащих слоях приводит к уменьшению $|\tilde{\sigma}_y^{\max}|$ во всех слоях. Для варианта однородного изотропного основания ($E_1 / \bar{E} = E_2 / E_1 = 1$) значения совпадают с данными [1].

Таблица 1. Значения $|\tilde{\sigma}_y^{\max}|$ в зависимости от отношения модулей упругости материала слоев и параметра $\tilde{y}_k(\tilde{y})$

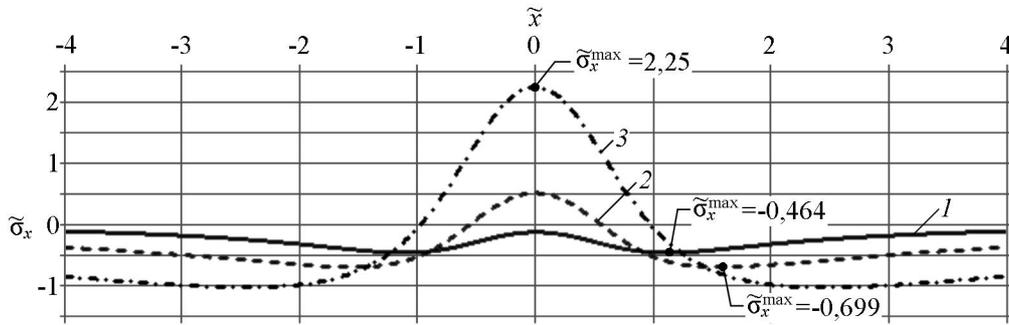
E_1 / \bar{E}		1			2		
E_2 / E_1		1	2	5	1	2	5
\tilde{y}_2	0,5	2,57	2,47	2,31	2,55	2,45	2,28
	0,0	1,73	1,55	1,27	1,67	1,48	1,19
1,0							
\tilde{y}_1	0,5	1,24	1,12	0,955	1,14	1,02	0,853
	0,0	0,961	0,880	0,769	0,847	0,768	0,666
	1,0						
\tilde{y}	0,0	0,655	0,611	0,553	0,588	0,543	0,487
	1,0						

Результаты вычислений параметра $|\tilde{\tau}_{xy}^{\max}|$ в горизонтальных сечениях основания, в зависимости от отношения модулей упругости материала слоев и параметра $\tilde{y}_k(\tilde{y})$, показаны в таблице 2. В числителе указана максимальная величина $\tilde{\tau}_{xy}$, в знаменателе – координата $|\tilde{x}|$, в которой возникает $|\tilde{\tau}_{xy}^{\max}|$. Из сопоставления данных следует, что при увеличении модуля упругости материала верхней полосы значение $|\tilde{\tau}_{xy}^{\max}|$ в этой полосе возрастает, а в нижних слоях – уменьшается. При увеличении отношения E_1 / \bar{E} значение $|\tilde{\tau}_{xy}^{\max}|$ возрастает в обеих полосах и уменьшается в полуплоскости.

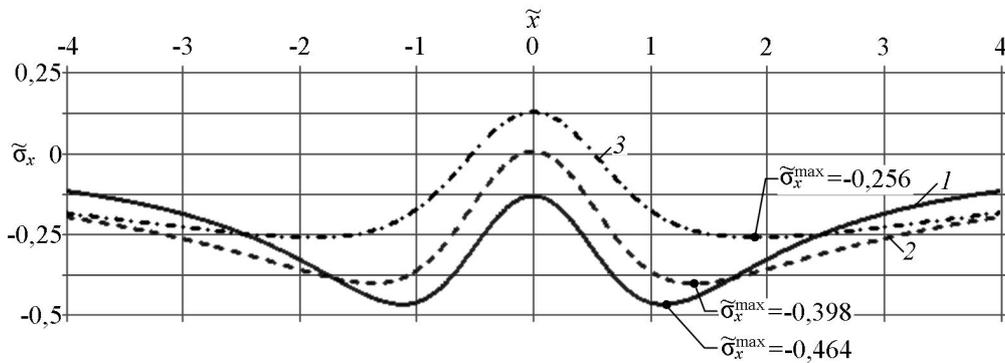
На рис. 3,а представлены графики изменения параметра $\tilde{\sigma}_x$ на нижней плоскости верхней полосы, на рис.3б – на верхней плоскости нижней полосы и указаны значения $\tilde{\sigma}_x^{\max}$. Кривая 1 соответствует случаю, когда модули упругости материала слоев одинаковы, кривая 2 построена при отношении $E_1 / \bar{E} = E_2 / E_1 = 2$, 3 – для варианта $E_1 / \bar{E} = 2, E_2 / E_1 = 5$. Видно, что при одном и том же значении координаты \tilde{x} на линии взаимодействия, когда материал полос имеет разные модули упругости, параметры $\tilde{\sigma}_x$ отличаются по величине, а при некоторых значениях \tilde{x} и по знаку.

Таблица 2. Значение $|\tilde{\tau}_{xy}^{\max}|$ в зависимости от отношения модулей упругости материала слоев и параметра $\tilde{y}_k(\tilde{y})$

E_1 / \bar{E}		1			2		
E_2 / E_1		1	2	5	1	2	5
\tilde{y}_2	0,5	$\frac{0,806}{0,538}$	$\frac{0,930}{0,551}$	$\frac{1,14}{0,575}$	$\frac{0,840}{0,544}$	$\frac{0,972}{0,559}$	$\frac{1,19}{0,584}$
	0,0	$\frac{0,552}{0,717}$	$\frac{0,512}{0,765}$	$\frac{0,410}{0,871}$	$\frac{0,609}{0,746}$	$\frac{0,572}{0,803}$	$\frac{0,462}{0,925}$
\tilde{y}_1	1,0	$\frac{0,401}{0,960}$	$\frac{0,369}{1,05}$	$\frac{0,311}{1,21}$	$\frac{0,451}{0,99}$	$\frac{0,412}{1,08}$	$\frac{0,342}{1,26}$
	0,5	$\frac{0,310}{1,23}$	$\frac{0,289}{1,33}$	$\frac{0,253}{1,54}$	$\frac{0,281}{1,33}$	$\frac{0,259}{1,45}$	$\frac{0,226}{1,69}$
	0,0	$\frac{0,212}{1,79}$	$\frac{0,201}{1,91}$	$\frac{0,185}{2,13}$	$\frac{0,193}{1,95}$	$\frac{0,181}{2,10}$	$\frac{0,166}{2,38}$



а. Изменение параметра $\tilde{\sigma}_x$ на нижней плоскости верхней полосы



б. Изменение параметра $\tilde{\sigma}_x$ на верхней плоскости нижней полосы

Рис. 3

В таблице 3 в числителе, в зависимости от величины $\tilde{y}_k(\tilde{y})$ и отношения модулей упругости материала слоев, показаны максимальные значения параметра $\tilde{\sigma}_x$, в знаменателе – координата $|\tilde{x}|$, где возникает $\tilde{\sigma}_x^{\max}$.

Рассмотрим влияние анизотропии грунта на примере основания, сложенного из намывного песчаного грунта, супесей и глинистых отложений (рис. 4). Мощность верхних слоев основания одинакова ($h_k = h$). Вертикальная распределенная нагрузка постоянной интенсивности q действует на участке длиной $2a = h$ симметрично относительно оси ординат. Для грунтов упругие постоянные приняты согласно [12]: песчаный намывной грунт – $E_2 = 23,0 \text{ МПа}$,

$E_2' = 16,0 \text{ МПа}^*$, $\nu_2' = 0,30^*$, $G_2' = 7,0 \text{ МПа}$; супесь текучая – $E_1 = 19,6 \text{ МПа}$, $E_1' = 18,4 \text{ МПа}^*$, $\nu_1' = 0,30^*$, $G_1' = 7,1 \text{ МПа}$; слоистые глинистые отложения – $\bar{E} = 67,5 \text{ МПа}$, $\bar{E}' = 17,0 \text{ МПа}^*$, $\bar{\nu}' = 0,04^*$.

Таблица 3. Значения $\tilde{\sigma}_x^{\max} \cdot 10$ в зависимости от отношения модулей упругости материала слоев и параметра $\tilde{y}_k(\tilde{y})$

E_1 / \bar{E}		1			2		
E_2 / E_1		1	2	5	1	2	5
\tilde{y}_2	0,5	$\frac{-7,85}{0,708}$	$\frac{-9,31}{0,707}$	$\frac{-11,4}{0,718}$	$\frac{-9,95}{0,695}$	$\frac{-12,0}{0,695}$	$\frac{-14,6}{0,707}$
	0,0	$\frac{-4,64}{1,12}$	$\frac{-6,45}{1,48}$	$\frac{19,7}{0,00}$	$\frac{-5,36}{1,10}$	$\frac{-6,99}{1,56}$	$\frac{22,5}{0,00}$
\tilde{y}_1	1,0	$\frac{-4,64}{1,12}$	$\frac{-3,79}{1,29}$	$\frac{-2,69}{1,56}$	$\frac{-5,36}{1,10}$	$\frac{-3,98}{1,37}$	$\frac{-2,56}{1,88}$
	0,5	$\frac{-3,22}{1,58}$	$\frac{-2,71}{1,80}$	$\frac{-2,03}{2,18}$	$\frac{-3,40}{2,00}$	$\frac{-2,80}{2,50}$	$\frac{2,11}{0,00}$
	0,0	$\frac{-2,45}{2,06}$	$\frac{-2,12}{2,31}$	$\frac{-1,65}{2,74}$	$\frac{3,60}{0,00}$	$\frac{3,85}{0,00}$	$\frac{3,81}{0,00}$
\tilde{y}	0,0	$\frac{-2,45}{2,06}$	$\frac{-2,12}{2,31}$	$\frac{-1,65}{2,74}$	$\frac{-1,97}{2,40}$	$\frac{-1,68}{2,76}$	$\frac{-1,30}{3,35}$
	1,0	$\frac{-1,65}{3,04}$	$\frac{-1,48}{3,33}$	$\frac{-1,22}{3,80}$	$\frac{-1,38}{3,48}$	$\frac{-1,21}{3,88}$	$\frac{-0,986}{4,49}$

Значение модуля сдвига для нижнего слоя $\bar{G}' = 12,76 \text{ МПа}$ вычислено по формуле [12]. Характеристики, принятые для расчета по модели трехслойного изотропного основания, отмечены (*).

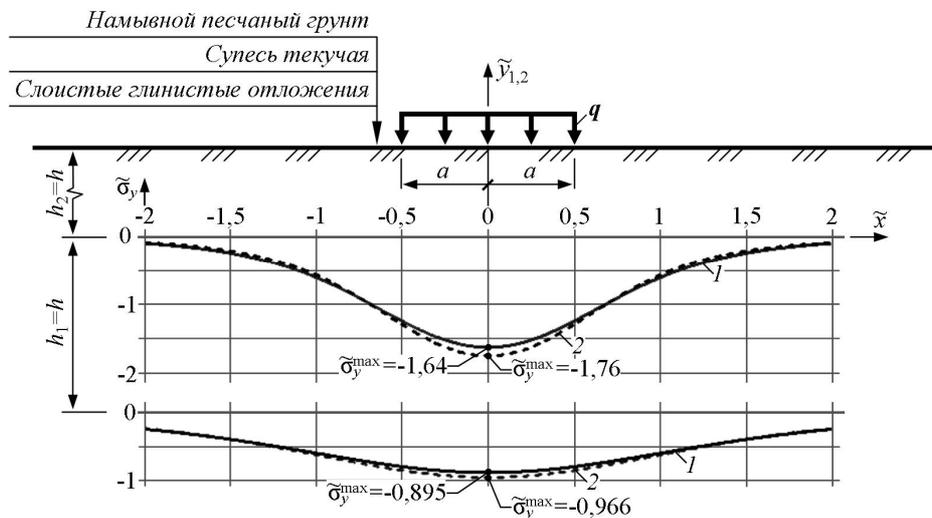


Рис. 4. Изменение параметра $\tilde{\sigma}_y$ на линии контакта слоев

Графики изменения параметров $\tilde{\sigma}_y$, $\tilde{\tau}_{xy}$ на линии контакта полос и на линии взаимодействия полосы и полуплоскости показаны на рисунках 4 и 5. Цифрой 1 обозначены кривые, построенные по модели трехслойного анизотропного основания, цифрой 2 – трехслойного изотропного. Характер кривых при расчете по анизотропной и изотропной моделям совпадает. Из сравнения кривых на рис.4 видно, что значение $\tilde{\sigma}_y^{\max}$ (при заданных упругих характеристиках материала слоев) больше для трехслойного изотропного основания.

Анализ кривых на рис.5 показывает, что для рассматриваемого трехслойного основания наличие анизотропии не оказывает значительного влияния на величину параметра $\tilde{\tau}_{xy}^{\max}$ на линиях контакта полос, полосы и полуплоскости.

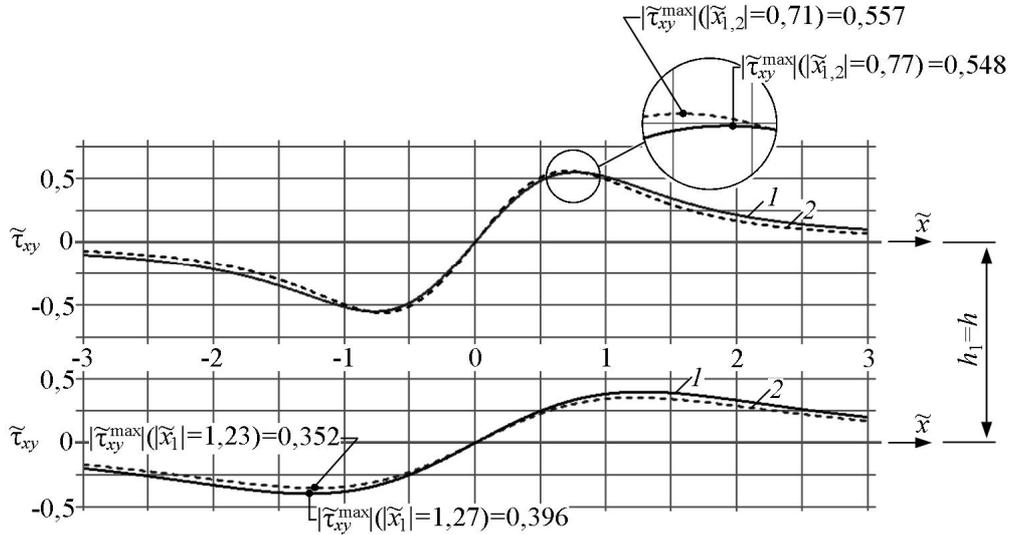


Рис.5. Изменение параметра $\tilde{\tau}_{xy}$ на линии контакта слоев

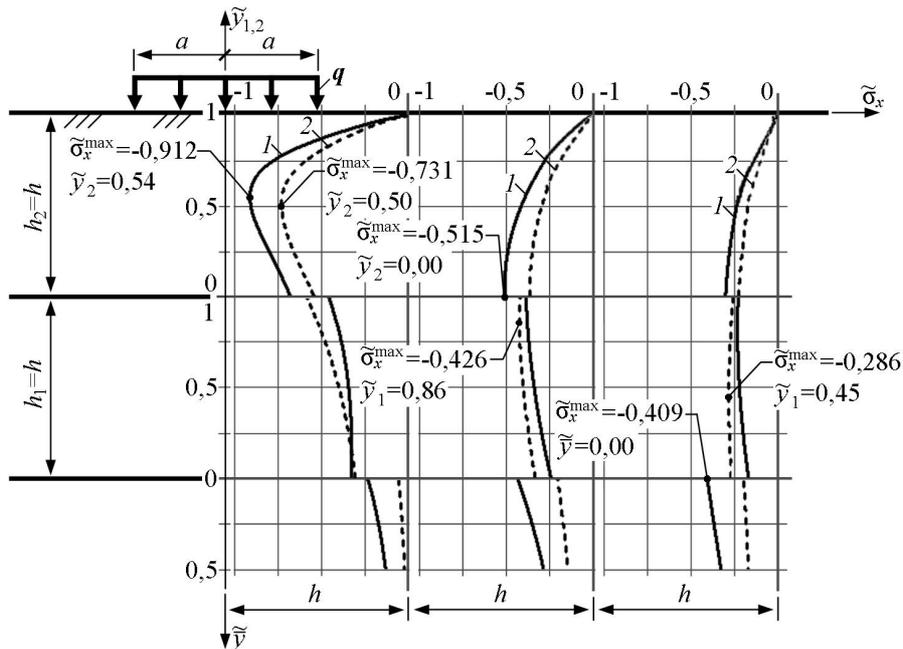


Рис.6. Эпюры распределения параметра $\tilde{\sigma}_x$ по высоте основания

На рис. 6 представлены эпюры распределения параметра $\tilde{\sigma}_x$ для вертикальных сечений. На графиках в каждом сечении указано значение $\tilde{\sigma}_x^{\max}$ и координата $\tilde{y}_k(\tilde{y})$, в которой оно возникает.

Исходя из уравнений, которые были использованы при проведении расчетов, нетрудно проанализировать характер напряженно-деформированного состояния для частных случаев: двухслойная анизотропная полоса при условии полного сцепления между слоями скреплена с жестким основанием; однослой-

ная анизотропная полоса скреплена с жестким основанием; анизотропная полоса скреплена с анизотропной полуплоскостью; анизотропная полуплоскость. Путем перехода от анизотропного материала к изотропному [15] можно рассмотреть аналогичный класс задач, когда одни слои составлены из изотропного материала, другие – анизотропного.

© Кудрявцев С.Г., Булдакова Ю.М. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1971. – 320 с.
2. Смирнов А.В., Мальшиев А.А., Ю.А. Агалаков. Механика устойчивости и разрушений дорожных конструкций. – Омск: СибАДИ, 1997. – 91 с.
3. Шехтер О.Я. Расчет бесконечной фундаментальной плиты, лежащей на упругом основании конечной и бесконечной мощности и нагруженной сосредоточенной силой // Сборник трудов научно-исследовательского сектора треста глубинных работ. – М.: Госстройиздат, 1939. – С. 133—139.
4. Раппопорт Р.М. Задача Буссинеска для слоистого упругого полупространства // Труды Ленинградского политехнического института. – 1948. – № 5. – С. 3—18.
5. Коган Б.И. Напряжения и деформации многослойных покрытий // Труды ХАДИ. – 1953. – Вып.14. – С. 33—46.
6. Кулагина М.Ф., Иванова В.И. Первая основная задача теории упругости для области, состоящей из полосы и полуплоскости // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. –2003. – № 19. – С. 89—96.
7. Потележко В.П. Задача Фламана для двухслойной полуплоскости // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2005. – № 1. – С. 29—33.
8. Голеско В.А. Определение радиальных напряжений и вертикальных перемещений в характерных точках трехслойного полупространства по аппроксимирующим зависимостям // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2005. – № 30. – С. 33—35.
9. Горская Е.В., Лушников Н.А., Лушников П.А. Анализ напряженно-деформированного состояния многослойных дорожных одежд // Трение и износ. – 2008. – Т.29, № 2. – С. 204—210.
10. Ширунов Г.Н. Метод начальных функций в модели упругого многослойного основания под действием нормальной локальной нагрузки // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №1(53). – С. 91—96.
11. Pan E. (1989) Static response of transversely isotropic and layered half-space to general surface loads. *Phys. Earth Planet Inter.* Vol. 54. P. 353—363.
12. Бугров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений. – СПб: Недра, 1993. – 245 с.
13. Круподеров А.В. Фундаментальные решения для многослойных трансверсально изотропных оснований // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2011. – №1. – С. 137—146.
14. Fabrikant V.I. (2013) Tangential contact problems for several transversely isotropic elastic layers bonded to an elastic foundation. *Journal of Engineering Mathematics.* Vol. 81. Issue 1. P. 93—126.
15. Кудрявцев С.Г., Булдакова Ю.М. Напряженное и деформированное состояние двухслойного анизотропного основания // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – № 5. – С. 9—20.
16. Кудрявцев С.Г., Булдакова Ю.М. Взаимодействие анизотропной полосы и жесткого основания // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2012. – № 4. – С. 29—35.

Поступила в редакцию 2 июля 2017 г. Прошла рецензирование 8 сентября 2017 г.

Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

КУДРЯВЦЕВ СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент. В 1974 окончил механический факультет Марийского политехнического института им. М. Горького и по распределению оставлен для работы на кафедре сопротивления материалов и теоретической механики в должности ассистента. 1978-1980 г.г. – аспирант кафедры сопротивления материалов и теории упругости Московского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева (научный руководитель – профессор, д.т.н. Лукаш П.А.). В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.23.17 Строительная механика. В 1991 году избран на должность доцента кафедры сопротивления материалов. Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженный работник образования республики Марий Эл. Область научных интересов: линейные и нелинейные задачи теории упругости.

Почтовый адрес: 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, дом 3, кафедра сопротивления материалов и прикладной механики ФГБОУ ВО «ПГТУ».

БУЛДАКОВА ЮЛИЯ МИХАЙЛОВНА – старший преподаватель кафедры сопротивления материалов и прикладной механики ФГБОУ ВО «ПГТУ». В 2010 году окончила строительный факультет в ГОУ ВПО "Марийский государственный технический университет" с присуждением квалификации инженер. С 2010 по 2013 год аспирант кафедры сопротивления материалов и прикладной механики ФГБОУ ВПО «ПГТУ». Работает на кафедре с 2014 года. Область научных интересов: линейные задачи теории упругости анизотропных тел.

Почтовый адрес: 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, дом 3, кафедра сопротивления материалов и прикладной механики ФГБОУ ВО «ПГТУ».

Для цитирования:

Кудрявцев С.Г., Булдакова Ю.М. Анализ напряженного состояния трехслойного анизотропного основания // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 16—24. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-16-24.

References

- Harr, M.E. (1971). *Foundations of Theoretical Soil Mechanics*. M.: Stroyizdat, 320 p. (In Russ.)
- Smirnov, A.V., Malyshev, A.A., Agalakov, Y.A. (1997). *Mechanics of the Stability and Destruction of Road Constructions*. Omsk: SibADI. 91 p. (In Russ.)
- Shekhter, O.Y. (1939). Calculation of an infinite fundamental plate lying on an elastic base of finite and infinite power and loaded with a concentrated force. *Collected Works of the Research Sector of the Trust of Deep Works*. M.: Gosstroizdat. 133—139. (In Russ.)
- Rappoport, R.M. (1948). The Boussinesq problem for a layered elastic half-space. *Proceedings of the Leningrad Polytechnic Institute* No 5. 3—18. (In Russ.)
- Kogan, B.I. (1953). Stresses and deformations of multilayer coatings. *Proceedings of HADI*. Issue 14. 33—46. (In Russ.)
- Kulagina, M.F., Ivanova, V.I. (2003). The first fundamental problem of the theory of elasticity for a domain consisting of a strip and a half-plane. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. No 19. 89—96. (In Russ.)
- Potelezhko, V.P. (2005). The Flaman problem for a two-layer half-plane. *Mechanics and Physics of Processes on the Surface and in the Contact of Solids, Parts of Technological and Power Equipment*. No 1. 29—33. (In Russ.)
- Golesko, V.A. (2005). Determination of radial stresses and vertical displacements at characteristic points of a three-layer half-space from approximating relationships. *Bulletin of the Kharkov National Automobile and Highway University*. No 30. 33—35. (In Russ.)
- Torskaya, E.V., Lushnikov, N.A., Lushnikov, P.A. (2008). Analysis of the stress-strain state of multilayer pavements. *Friction and Wear*, Vol. 29, № 2. 204—210. (In Russ.)
- Shirunov, G.N. (2015). Method of initial functions in model of compression linearly deformable layered foundation under normal local load. *Magazine of Civil Engineering*. №1(53). 91—96. (In Russ.)
- Pan, E. (1989). Static response of transversely isotropic and layered half-space to general surface loads. *Phys. Earth Planet Inter.* Vol. 54. 353—363.
- Bugrov, A.K., Golubev, A.I. (1993). *Anisotropic Soils and Foundations of Structures*. SPb.: Nedra, 245 p. (In Russ.)
- Krupoderov, A.V. (2011). Fundamental solutions for multilayer transversal-isotropic bases. *Izvestiya of TSU. Sciences of Earth*. No 1. 137—146. (In Russ.)

14. *Fabrikant, V.I.* (2013). Tangential contact problems for several transversely isotropic elastic layers bonded to an elastic foundation. *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 81, Iss. 1. 93—126.
15. *Kudryavtsev, S.G., Buldakova, J.M.* (2015). Stress-strain state of two-layered anisotropic foundation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 5. 9—20. (In Russ.)
16. *Kudryavtsev, S.G., Buldakova, J.M.* (2012). Interaction of anisotropic band and rigid base. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 4. 29—35. (In Russ.)

ANALYSIS OF THE STRESS STATE OF THREE-LAYERED ANISOTROPIC FOUNDATION

S.G. KUDRYAVTSEV, J.M. BULDAKOVA

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education
“Volga State University of Technology”*

The results of calculations based on the equations of the plane problem of the theory of elasticity for determining stresses in a three-layer anisotropic base under the action of a static normal surface load are presented. It is considered a variant of the complete cohesion between the layers.

The stress functions in each layer are written through the normal and tangential forces arising on the line of contact between the strip and the half-plane. The contact forces between the strip and the half-plane are determined from the system of two equations and conditions on the surface of the base. As a result, the stress functions in each layer are written through the surface load in the form of improper integrals.

An analysis of the stress state is carried out according to the model of a three-layer isotropic base, depending on the elastic characteristics of the material of the layers. The influence of anisotropy of the material of layers in a three-layer soil mass is shown.

Key words: stress, anisotropy, elasticity, strip, half-plane.

Article history: Received: July 2, 2017. Revised: September 8, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors:

KUDRYAVTSEV SERGEY GENNADIEVICH, candidate of technical sciences, docent. In 1974, he graduated from the mechanical faculty of the Mari Polytechnic Institute named after M. Gorky and the distribution of the strength of materials and theoretical mechanics in the post of assistant was left for work at the department. 1978-1980: postgraduate of the department of strength of materials and the theory of elasticity of the Moscow Institute of Civil Engineering named after V.V. Kuibyshev (scientific leader – Professor, doctor of technical Sciences Lucas P.A.). In 1987, he defended his thesis on specialty 05.23.17 “Structural Mechanics”. In 1991, he was elected to the post of docent of strength of materials. Honored Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honored Worker of Education of the Republic of Mari El. Research interests: linear and nonlinear problems in the theory of elasticity.

Mailing address: 424000, the Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin Sq., b. 3, the Department of materials resistance and applied mechanics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Volga State University of Technology”.

BULDAKOVA JULIA MIKHAILOVNA, senior lecturer of chair of materials resistance and applied mechanics of the Volga State University of Technology. In 2010, she graduated from the faculty of civil engineering of Mari State Technical University with the award of the qualification the engineer. From 2010 to 2013, she was postgraduate student of chair of materials resistance and applied mechanics of Volga Tech. She is working at the Department since 2014. Research interests: linear theory of elasticity of anisotropic bodies.

Mailing address: 424000, the Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin Sq., b. 3, the Department of materials resistance and applied mechanics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Volga State University of Technology”.

For citation:

Kudryavtsev S.G., Buldakova J.M. (2017) Analysis of the stress state of three-layered anisotropic foundation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 5. 16—24. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-16-24. (In Russ.)

Расчет и проектирование строительных конструкций

УДК 69:624.012.3/4

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-25-36

ОШИБКИ МЕЖДУНАРОДНЫХ НОРМ ПО ЖЕЛЕЗОБЕТОНУ И ПРАВИЛА ЕВРОКОДА

*Р.С. САНЖАРОВСКИЙ, д.т.н, проф.

**М.М. МАНЧЕНКО, к.т.н., ст. науч. сотр.

*ЕНУ им. Л.Н. Гумилева

010000, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2

**ФГУП "Крыловский государственный научный центр"

196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44; manchenko.se@gmail.com

Выявлены и исследуются три типа грубых ошибок международных норм бетона и железобетона, вызванных нарушением правил Еврокодов. Два типа – связаны с потерей мгновенной нелинейности бетона: ошибочная замена упругопластической деформации деформациями линейной ползучести бетона; подмена процесса непрерывного нагружения конструкции скачком, минуя упругопластическую стадию, из упругой стадии в пластический шарнир. Третий тип – вызван принципом наложения при ползучести бетона, состоящим в ошибочном копировании принципа линейной суперпозиции Больцмана. Статья написана в соответствии с рекомендациями круглого стола, состоявшегося в Российском университете дружбы народов 09.06.2016 под руководством д.т.н., проф. С.Н. Кривошапко.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: упругопластические деформации бетона, теория ползучести бетона, длительное сопротивление конструкций, современные строительные нормы.

«Тщательное последование порядку или, что то же, системе служит в каждой науке ручательством успеха в ней ... Отвержение системы ... служит источником превратных понятий, источником знания, которое хуже незнания, будучи знанием неправильным, отрицательным».

Игнатий Брянчанинов

Еврокод по бетону и железобетону вообрал в себя многочисленные научные разработки и опыт выдающихся ученых различных стран, мотивированную формулировку основных принципов и правил, общую теорию расчета упругопластических систем и обстоятельные экспериментальные данные. Еврокод указывает на нераздельную совокупность своих частей [1], [9], [10]:

1. Принципов и Правил применения Еврокода;
2. национального приложения (*National Annex*), реализующего эти Принципы и Правила;
3. запрещается каким-либо образом «изменять или модифицировать» установленный перечень Принципов и Правил.

Правила устанавливают фундаментальные упругопластические свойства бетона и арматуры, способы описания этих свойств, методы их использования в расчетах конструкций (часть I):

1. основным предельным состоянием является «потеря статического равновесия конструкции ..., когда прочность материалов конструкции обычно не играет роли» (Принципы проектирования по предельным состояниям содержатся в *EN 1990*. Раньше в СССР сущность метода расчета по предельным состояниям была сформулирована в виде: выполнять «анализ всего процесса перехода конструкции в предельное состояние в его последовательном развитии»);

2. непрерывно сохраняются условия равновесия железобетонной конструкции на всех этапах ее нагружения;

3. непрерывно выполняются условия совместности деформаций бетона и арматуры;

4. для определения напряженно-деформированного состояния железобетонных сечений привлекается гипотеза плоских сечений и гипотезы пп. 5, 6, 7;

5. считаются известными для случая неоднородного напряженного состояния упругопластические диаграммы σ - ε ограниченной протяженности для бетона и арматуры, позволяющие по известным деформациям найти напряжения в различных точках сечения;

6. считается обоснованным указанные в п. 5 диаграммы получать из опытов по однородному напряженному состоянию простого сжатия и растяжения (для описания этих диаграмм предложены различные аналитические зависимости, в том числе *Sargina M.* (Канада) с ниспадающим участком);

7. сопротивление бетона растяжению можно не учитывать;

8. используется приближенное значение кривизны изогнутой оси элемента конструкции.

Реализация (часть II) перечисленной выше совокупности не состоит только в её цитировании, но эта реализация имеет свой математический порядок:

а. формулировка совокупности Принципов и Правил;

б. математическая реализация совокупности в конкретном расчете конструкции;

в. построение вычислительной механики расчета данной конструкции, в том числе исследование «ряда формальных процедур, например, такие атрибуты, как сходимость, устойчивость, оценка точности решения»;

г. проведение численных экспериментов;

д. анализ результатов расчета и формулировка удобных для проектировщика нормативных схем;

е. примеры применения этих схем.

Разработчики Еврокода продемонстрировали образец этой реализации (часть I + часть II), и построили график, приведенный на рисунке 1, для расчета внецентренно сжатых бетонных конструкций [2].

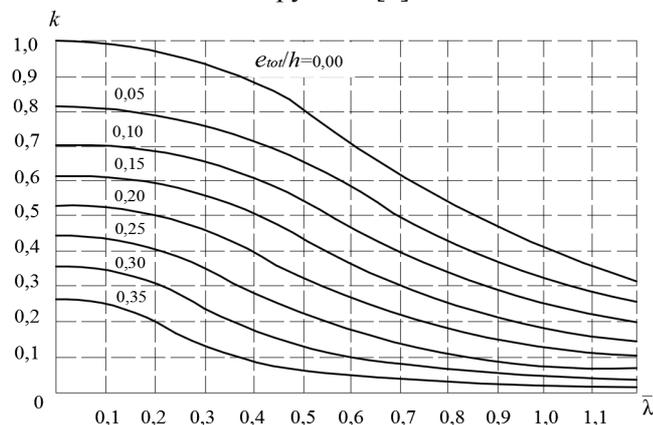


Рис. 1. График расчета внецентренно сжатых бетонных конструкций

По оси абсцисс обычно располагают длину колонны L , либо гибкость λ , либо условную гибкость $\bar{\lambda}$. По оси ординат откладывают продольную силу сжатия P , либо коэффициент продольного изгиба k . Положение каждой кривой на диаграмме определяется относительным e/h (либо приведенным m) эксцентриситетом, либо относительным начальным прогибом f_{00}/L , либо относительной величиной поперечной нагрузки.

Изменение расчетной схемы сжатия конструкции может существенно изменить характер поведения кривых предельных состояний. Например, для сжато-изогнутых конструкций с начальной погибью, также при наличии поперечной нагрузки, поведение кривых предельной несущей способности, рисунок 2, существенно отличается от данных рисунка 1: при нулевой длине ($\lambda=0$) все кривые сходятся в одной точке $k=1$, давая более экономичные решения расчета конструкций. В области малых гибкостей отличия несущей способности составляют несколько раз. Это обстоятельство свидетельствует о том, что формальная подмена лишь расчетной схемы колонны может привести к существенным неэкономичным решениям.

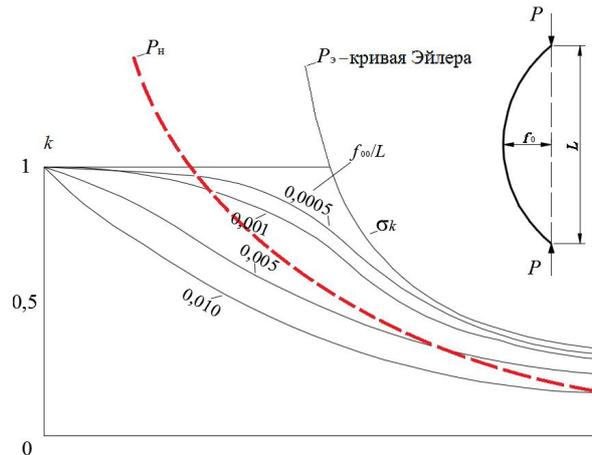


Рис. 2. График расчета сжато-изогнутых бетонных конструкций с начальной погибью

В нормативных методах расчета часто делается подмена (без необходимых разъяснений) модели внецентренно-изогнутого стержня моделью сжато-изогнутого и наоборот. Такая замена расчетных моделей сопряжена с получением достаточно существенных различий и неэкономичных решений в результатах проектирования [1], [11], [12].

Следует обратить внимание, что при изменении вида диаграммы σ - ϵ бетона и арматуры, характер поведения кривых по рисункам 1, 2 не изменяется; он также не изменяется при изменении вида поперечного сечения конструкции. Однако расположение на диаграмме кривых относительно друг друга при этом заметно меняется: например, форма поперечного сечения колонны оказывает существенное влияние на значения предельных сил, различие в которых может достигать до 90 %. Обратим внимание, что диаграммы на рисунках 1, 2 полностью соответствуют по Еврокоду упругопластической теории работы сжатоизогнутой конструкции; справа упругопластическая стадия работы ограничена упругой кривой Эйлера, указанной на рисунке 2.

В данной статье мы рассмотрим три типа грубых ошибок: два из них – по расчету несущей способности в области кратковременного нагружения железобетонных конструкций, учитывающей только мгновенные нелинейные свойства бетона и арматуры; третий тип – содержится в принципе наложения, на котором основана вся теория длительного сопротивления железобетона.

Система Правил и Принципов Еврокода (для случая кратковременного нагружения) является полной и независимой, то есть отдельные Правила не являются частным случаем или следуют из других Правил этой системы.

Выявляются два варианта нарушения этой системы: подмена либо одного из правил системы, либо подмена системы в целом.

Первый вариант ошибки. Нормы грубо искажают значение пластической составляющей деформации ε_n , присутствующей в значении полной мгновенной деформации $\varepsilon_M = \varepsilon_l + \varepsilon_n$, рис. 3. [5], [7].

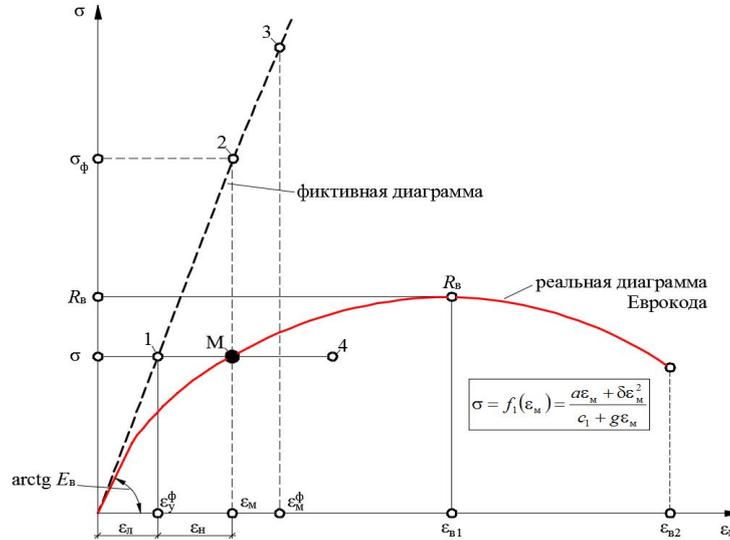


Рис. 3. Искажение диаграммы σ - ε бетона

Пластическая деформация Еврокода ε_n подменяется, вопреки очевидной целесообразности, и определяется с помощью математических уравнений линейной теории ползучести бетона, совместно с присущими этой теории ошибками. Основное уравнение для деформации $\varepsilon_\sigma(t)$ в результате напряжения σ записывается в виде (сохранены оригинальные обозначения [3], [4], [5])

$$\varepsilon_\sigma(t) = \sigma(t_0)I(t, t_0) + \int_{t_0}^t I(t, t') d\sigma(t'). \quad (1)$$

Здесь t – рассматриваемое время, t' – время приложения «удельного длительного одноосно приложенного» напряжения $\sigma(t')$.

«Функция податливости» $I(t, t')$ в этом уравнении является суммой упругой деформации и деформации ползучести

$$I(t, t') = \frac{1}{E_c(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_c(t')},$$

где $E_c(t')$ – модуль упругости бетона; $\phi(t, t')/E_c(t') = C(t, t')$;

$\phi(t, t')$ – характеристика ползучести бетона; $C(t, t')$ – мера ползучести бетона.

Последняя записывается в виде суммы:

$$C(t, t') = C_n(t, t') + C_o(t, t'). \quad (2)$$

Здесь $C_n(t, t')$ предназначено для нахождения той части деформации (подменяющей собой пластическую мгновенную деформацию) $\varepsilon_n(t)$, которая проявляется при малых значениях $(t-t')$, определяемых секундами и минутами – например, до 1 мин.; $C_o(t, t')$ предназначено для нахождения деформации линейной ползучести $\varepsilon_n(t)$ при значениях $(t-t')$, определяемых сутками и годами («явление медленно протекающих деформаций бетона»).

Из множества различных выражений, предложенных для описания (2), мы (для наглядности последующего анализа ошибок) в дальнейшем подробно рассмотрим одно из известных выражений Мак-Генри, Александровского С.В. [8]:

$$C(t, t') = A_4 \left[1 - e^{-\alpha(t-t')} \right] + A_3 \left[1 - e^{-\gamma(t-t')} \right]. \quad (3)$$

Следует иметь в виду, что усложнение выражений, предназначенных для описания (2), повышает лишь порядок дифференциального уравнения задачи, но не изменяет сущность проводимого анализа ошибок, в частности, нарушения принципа независимости действия сил (принцип наложения) – фундамента любой теории ползучести.

Рассмотрим интервал времени $t - t' \leq 1$ мин, на котором деформацию ползучести $\varepsilon_n(t)$ можно считать равной нулю, так как для проявления ползучести бетона необходим минимальный интервал $t - t' \leq 24 \cdot 60 = 1440$ мин, виду принятого масштаба описания $C_0(t, t')$. На интервале времени $t - t' \leq 1$ мин уравнение (1) примет вид:

$$\varepsilon_n(t) = \sigma(t_0)I_n(t, t_0) + \int_{t_0}^t I_n(t, t')d\sigma(t'), \quad (4)$$

где
$$I_n(t, t') = \frac{1}{E_c(t')} + \frac{\phi_n(t, t')}{E_c(t')} = \frac{1}{E_c(t')} + C_n(t, t').$$

После очевидных преобразований запишем из (4) основной закон мгновенного упругопластического деформирования бетона

$$\varepsilon_M(t) = \frac{\sigma(t)}{E_c(t)} - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{1}{E_c(\tau)} - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} C_n(t, \tau) d\tau, \quad (5)$$

соответствующих ряду известных международных норм.

Пластические деформации бетона, описываемые последним слагаемым в (5), носят название «быстронатекающей ползучести», которое часто используется в научных публикациях многих известных ученых. Известны и другие названия, например «минутная ползучесть», «начальный крутой подъем кривых ползучести» и т.д.

Использованием зависимости (5) отвергается нелинейная упругопластическая зависимость (3.14) Еврокода 2:

$$\frac{\sigma_c}{f_{ct}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, \quad (6)$$

где $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$, а также грубо искажается расчет реальных конструкций: диаграмма по рисунку 1.

Из этой зависимости (6) $\sigma_c = f_1(\varepsilon_c)$ (для получения обратной функции $\varepsilon_c = f_2(\sigma_c)$ можно воспользоваться рядом Лагранжа) имеем:

$$\varepsilon_M = \varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} + B_2 \sigma_c^2 + \dots, \quad (7)$$

где
$$B_2 = \frac{E_c \left(\frac{E_c}{f_{ct}} - \frac{2}{\varepsilon_{c1}} \right) + \frac{f_{ct}}{\varepsilon_{c1}^2}}{E_c^3};$$

первое слагаемое σ_c/E_c описывает мгновенные упругие деформации; остальные слагаемые в алгебраической форме дают значения мгновенной пластической деформации бетона, причем достаточно ограничиться вторым слагаемым $B_2 \sigma_c^2$.

Сопоставление (5) и (7) показывает, что нарушение правил Еврокода в международных нормах без надобности осложняет математическое описание пластических деформаций и не дает никакого положительного результата [6].

Во-первых, запись в виде линейного интегрального уравнения (5) не может описать мгновенного нелинейного упругопластического деформирования бетона. Во-вторых, в записи (5) содержатся две грубые ошибки: первые два слагаемых неверно описывают свойство линейных (потенциальных) сил, исходя из правил аналитической механики, так как второе слагаемое является лишним – используемая форма принципа наложения нестационарных линейных сил неверна; в третьем слагаемом (5) также содержится ошибка, состоящая в следующем.

Найдем скорость деформации $\dot{\epsilon}_H(t)$:

$$\dot{\epsilon}_H(t) = \dot{\sigma}(t) \cdot C_H(t, \tau) + \sigma(\tau) \frac{\partial C_H(t, \tau)}{\partial \tau} + \sigma(\tau) \frac{\partial C_H(t, \tau)}{\partial t},$$

и её величину

$$\epsilon_H(t) = \sigma(t_0) \cdot C_H(t, t_0) + \int_{t_0}^t \dot{\sigma}(\tau) \cdot \partial C_H(t, \tau) \partial \tau + \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial C_H(t, \tau)}{\partial \tau} \partial \tau.$$

После преобразований имеем:

$$\epsilon_H(t) = \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial C_H(t, \tau)}{\partial \tau} \partial \tau. \quad (8)$$

Последнее слагаемое в (5) и выражение (8) не отличаются друг от друга только при использовании разностных ядер, что характеризует соответствующий принцип наложения.

Выявляются еще три дефекта, возникающие от ошибочной идеи (2). Первый дефект состоит в искажении экспериментальных данных по мгновенным диаграммам сжатия бетона. С 1899 года известные во всем мире ученые (Риттер, Франк, Залигер, Бах, Шюле, Эмпергер и др.) подчеркивали мгновенную нелинейность бетона, описывали её аналитически, четко разделяя деформации упругие, пластические и деформации ползучести. С появлением же ошибочной идеи, записанной нами в виде (5), резко изменились высказывания в научных изданиях: «Бетон часто рассматривается как материал в значительной степени неупругий, во всяком случае, не следующий закону Гука ... поэтому нередко считают модуль упругости бетона величиной переменной, убывающей по мере роста напряжений ... К счастью, это не так. Отличия от закона Гука для бетона объясняются влиянием времени ... Путем экстраполяции получается «кривая мгновенных деформаций», которая оказывается четко прямолинейной».

А как же обстоятельные эксперименты *Yoschida* 1930 г., рис. 4, как же иные многочисленные эксперименты, обосновавшие Еврокод 2.

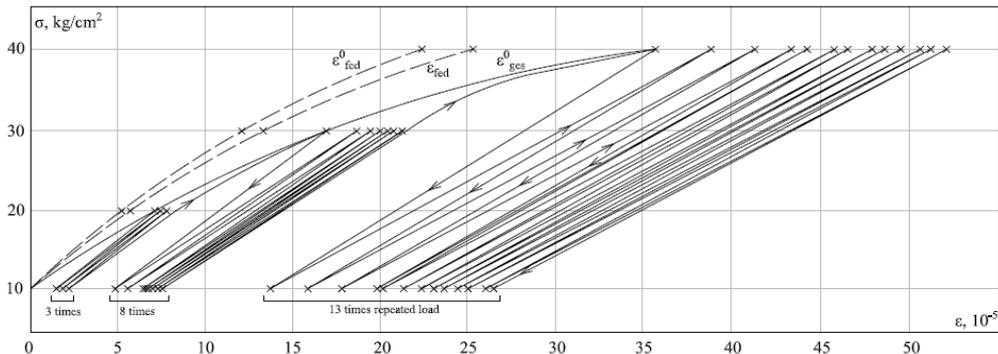


Рис. 4

Появляется версия ряда работ о скоростном нагружении бетона: «Под упруго-мгновенными следует понимать деформации, развивающиеся под действием статической нагрузки с весьма большой скоростью». Здесь игнорируется тот факт, что скоростное нагружение бетона – это другая научная проблема (*Watsteen, Hatana, Susumu*, Майоров, Шарипов и др.). В этой проблеме рассматривается диаграмма динамического нагружения бетона, соответствующая импульсивному нагружению конструкций в динамических задачах. В конце концов появилось формальное утверждение об абстрактных экспериментах: «мгновенные деформации линейно связаны с напряжениями и соответственно модуль упруго-мгновенных деформаций не зависит от значения и знака напряжений».

Второй дефект обнаруживается при использовании ошибочной идеи (2), (5) для расчета упругопластических конструкций, представленных на рисунках 1, 2. Рассмотрим поучительный пример продольного изгиба сжатой колонны в промежутке времени нескольких минут, когда успевает проявиться только первое слагаемое в (2), и деформирование бетона определяется уравнением (5). В соответствии с известными решениями Ржаницына А.Р., Работнова Ю.Н., Бунятяна Л.Б., Прокоповича И.Е. и других ученых, критическая сила продольного сжатия определяется формулой:

$$P_n = P_0 \frac{1}{1 + \phi_n(t_0, \infty)}.$$

В соответствии с данными рис. 3 о соотношениях ε_y , ε_n , ε_m , принимаем значение характеристики $\phi_n(t, \infty) \cong 1$. Соответствующая кривая на рис. 2 для значений силы P_n показана пунктирной линией. Сравнивая поведение этой кривой, например, с кривой, соответствующей значению $f_{00}/L = 0,0005$, мы видим, что при уменьшающихся и стремящихся к нулю значениях гибкости, значение силы P_n устремляется к бесконечности, что отвергается и экспериментами над кратковременным нагружением реальных колонн, и здравым смыслом. Этот результат в теории железобетона известен давно после экспериментальных и теоретических работ *L. Baes* 1927 года.

Третий дефект обнаруживается при условии преобразования интегральной формы уравнения (1) к дифференциальному виду с учетом записи (2). Предложено много выражений $C(t, t')$, предназначенных для аппроксимации удельной деформации ползучести. В этих предположениях не учитывается важное обстоятельство: в большинстве выражений среди прочих сил, участвующих в формировании деформаций ползучести, возникают силы, пропорциональные полному ускорению $\ddot{\varepsilon}_\sigma(t)$, что несовместимо с ньютоновой механикой. Сила σ может быть функцией от положения (координаты), скорости, времени, других величин. Если же присутствует (среди прочих) сила σ , пропорциональная ускорению $\ddot{\varepsilon}_\sigma(t)$, то оказывается нарушенным принцип независимости действия сил. Парс Л. давно показал неприменимость таких сил в задачах механики, в частности, в разработках Биркгофа Д.

Чтобы установить наличие сил, пропорциональных $\ddot{\varepsilon}_\sigma(t)$, необходимо уравнение (1) привести к дифференциальной форме.

К примеру, с учетом (3) получаем:

$$a_2 \ddot{\varepsilon}_\sigma(t) + a_1 \dot{\varepsilon}_\sigma(t) + a \varepsilon_\sigma(t) = b_2 \ddot{\sigma}(t) + b_1 \dot{\sigma}(t) + b \sigma(t), \quad (9)$$

где $a_2 = E_c$; $a_1 = (\alpha + \gamma)E_c$; $a = \alpha\gamma E_c$; $b_2 = 1$; $b_1 = (\alpha + \gamma) + E_c A_4 \alpha + E_c A_3 \gamma$;
 $b = (1 + E_c A_4 + E_c A_3) \alpha \gamma$.

Из (9) находим $\sigma(t)$: $\sigma(t) = \mu \ddot{\varepsilon}_\sigma(t) + F_1$, где

$$\mu = \frac{a_1}{b}; \quad F_1 = \frac{a_1}{b} \dot{\varepsilon}_\sigma(t) + \frac{a}{b} \varepsilon_\sigma(t) - \frac{b_2}{b} \ddot{\sigma}(t) - \frac{b_1}{b} \dot{\sigma}(t).$$

Записываем основное уравнение динамики, свидетельствующее о нарушении принципа независимости действия сил

$$m\ddot{\varepsilon}_\sigma(t) = \sigma(t) = \mu\ddot{\sigma}(t) + F_1, \quad \text{где } m - \text{масса.}$$

При предположении о переменных $A_3(\tau)$, $A_4(\tau)$ и устранении математических ошибок, перечисленных выше, также при использовании меры ползучести Мак-Генри, имеем аналогичный результат, свидетельствующий о нарушении принципа наложения.

Второй вариант ошибки. Ввиду сложности и затратности реализации совокупности а-е (часть II Еврокода, см. выше), национальные органы стандартизации ряда стран относят её к задачам рядовых проектировщиков, хотя основной перечень 1-8 может излагаться и отдельным изданием. Такая незатратность (помимо нарушения Еврокода) перетекает в громадную неэкономичность конструкций в реальном строительстве, и которая ложится на плечи потребителей норм. В национальном же приложении используется добавочный (иной) перечень правил, отвергающий систему 1-8 Еврокода, и с её точки зрения – ошибочный. Добавочный перечень правил приставляется к основному перечню и таким способом замещает его:

9. бетон и арматура наделяются свойством неограниченной текучести (по *V.G. Neal* – пластическое течение);
10. за основную расчетную модель сечения принимается пластический шарнир, невозможный в железобетонных конструкциях – рисунки 1, 2;
11. бетон и арматура также наделяются, одновременно с неограниченной текучестью, свойством неограниченной упругости при растяжении и сжатии;
12. из теории упругой устойчивости заимствуется модель колонны с бесконечными прогибами и напряжениями (Тимошенко С.П.);
13. связь несовместимых между собой (по Эмпергеру) расчетных моделей осуществляется введением удивительной гипотезы – упругая модель мгновенно перескакивает в модель пластического шарнира: здесь скачком у упругой колонны исчезает длина, а у колонны с пластическим шарниром и без длины появляется бесконечный прогиб, нарушается непрерывность процесса метода предельных состояний;
14. упругие свойства железобетона искажаются из-за подмены жесткости сечения, либо модуля упругости (фундамента теории) некоторой условной величиной;
15. величина условного модуля упругости (также условной жесткости) определяется с ошибкой ввиду неверного анализа сути экспериментальной модели.

Схема и последовательность реализации второго варианта ошибки демонстрируется на рисунке 5. На нем представлены три типа совершенно разных тел, отличающихся по физическим и геометрическим свойствам. Кривая I на левой стороне рисунка характеризует типичную зависимость «сила-прогиб» колонны длиной L выполненной из неограниченно упругого материала; все кривые имеют предельные силу P_y и бесконечный прогиб f_y .

Правая сторона рисунка представляет типичную для железобетона диаграмму *OABL* Еврокода; произвольная точка $M_{оп}$ связывает между собой три величины: $e_{оп}$, $L_{оп}$, $P_{оп}$ (опытные, либо теоретические); P_T – прочность колонн при осевом сжатии. Средняя вертикальная линия II характеризует все колонны с пластическими шарнирами, возможными только при выполнении правила 9 и отсутствии у колонн длины ($L = 0$).

Горизонтальные стрелки S_1, S_3, S_4 показывают направления перескоков между двумя различными (по физическим и геометрическим параметрам) телами I и II.

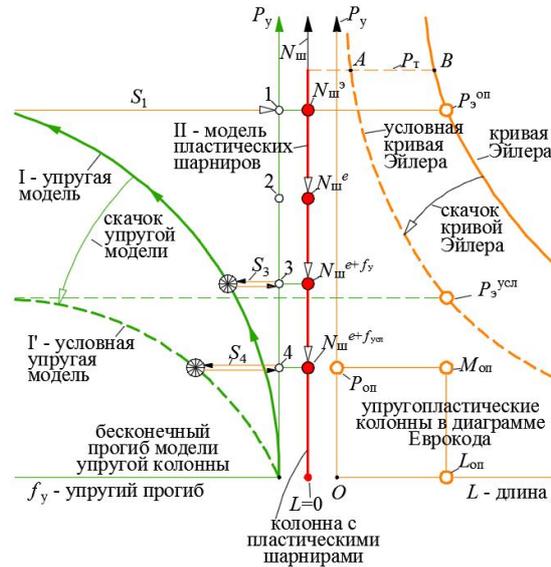


Рис. 5. Система подмены упругопластической диаграммы Еврокода

Вертикальные стрелки $N_{ш}^e N_{ш}^e$, $N_{ш}^e N_{ш}^{e+f_y}$, $N_{ш}^{e+f_y} N_{ш}^{e+f_{y,сл}}$ показывают направления перескоков в модели пластических шарниров. Здесь сила $N_{ш}^e$ соответствует пластическому шарниру с заданным эксцентриситетом $e_{ш} = e_{оп}$; она сильно завышает продольную силу в сравнении с заданной силой $P_{оп}$. Ввиду этого в шарнире увеличивается эксцентриситет $e_{ш} = e_{оп} + f_y$ на величину прогиба упругой модели. Получаемая сила $N_{ш}^{e+f_y}$ также сильно превышает заданную силу $P_{оп}$.

Ввиду последнего, организуется скачок упругой модели I путем склонения её в положение I' с названием условная упругая модель. Для целей скачка приравниваются:

- момент упругой колонны: $M_y = P_y \frac{e_y}{1 - P_y / P_3}$;
 - момент колонны с пластическим шарниром: $M_{ш} = N_{ш} e_{ш}$,
- а также их продольные силы.

Из значения P_3 находится жесткость упругой колонны

$$D_y = \frac{P_y L_y^2}{1 - \frac{P_y}{M_{ш}} e_y} \frac{1}{\pi^2}.$$

В эту формулу подставляются экспериментальные данные $e_{оп}$, $L_{оп}$, $P_{оп}$; получается значение условной жесткости

$$D_{усл} = \frac{P_{оп} L_{оп}^2}{1 - \frac{P_{оп}}{M_{ш} P_{оп}} e_{оп}} \frac{1}{\pi^2}.$$

Из структуры данного выражения видно, что при вычислении значений $D_{усл}$ необходимо учитывать значения трех параметров

$$D_{\text{усл}} = D_{\text{усл}}(P, L, e),$$

с соответствующими оценками их значимости. В противном случае мы получим слишком грубые, ненадежные и неэкономичные результаты расчетов.

В большинстве же современных норм, основанных не на Еврокоде, а на использовании условной жесткости, это обстоятельство не учитывается, что является достаточно грубой ошибкой. В некоторых эмпирических формулах зафиксированы постоянные значения $P = C_1$ и $L = C_2$, и использован вырожденный и ошибочный вид условной жесткости

$$D_{\text{усл}} = D_{\text{усл}}(C_1, C_2, e),$$

что не соответствует существующим экспериментальным данным с разбросом $\pm 50\%$, рис. 6.

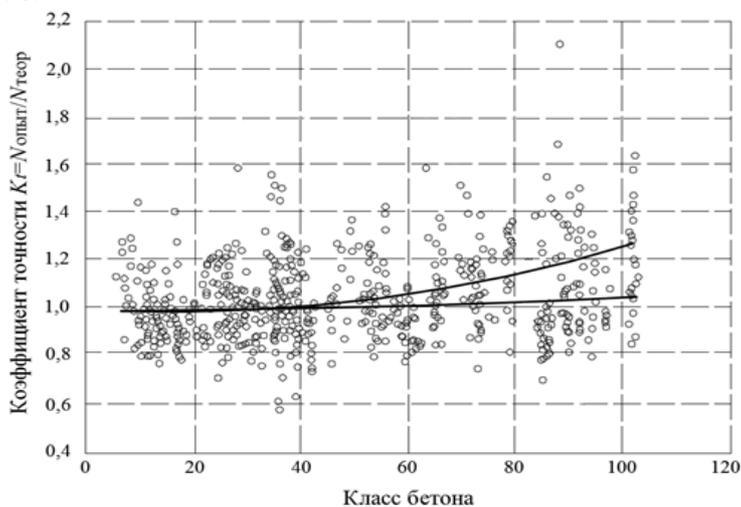


Рис. 6

Нижняя жирная линии на этом рисунке соответствует случаю

$$D_{\text{усл}} = D_{\text{усл}}(C_1, C_2, C_3) = const.$$

Данные экспериментов по кратковременному сжатию железобетонных колонн, приведенные на рисунке 6, дополняют требования о необходимости строгого исполнения системы Еврокодов. С иной точки зрения они свидетельствуют о несостоятельности тех приемов различных национальных и межнациональных норм, которыми пытаются подменить фундаментальные упругопластические свойства железобетонных конструкций, тщательно исследованные и утвержденные Еврокодом, а также согласованными с *ISO*.

Следует заметить, что помимо изготовления части I и части II норм и проведения необходимых математических разработок, ведущие страны Европы также разрабатывают обстоятельные руководства для проектировщиков по практическому применению правил Еврокода 2, например [9].

Третий тип ошибки возникает вследствие соединения несовместимых между собой нестационарных вязкоупругих свойств бетона (переменный во времени модуль упругости, учет факторов старения бетона) и принципа суперпозиции Больцмана. В результате соединения, в (1), под знаком интеграла утеряны четыре слагаемых, обусловленных необходимостью учитывать скорость изменения функции податливости $I(t, t')$. Кроме того, к деформациям ползучести ошибочно причислены упругие деформации, вызванные изменением во времени модуля упругости бетона. Погрешность принципа наложения существенно возрастает при традиционном способе учета нелинейной ползучести бетона.

Исследованию этих вопросов мы посвятим отдельную статью путем сопоставления свойств принципа наложения и принципа суперпозиции Больцмана.

© Санжаровский Р.С., Манченко М.М. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Rybnov E, Sanzharovsky R., Figovsky O., Beilin D. Durability and Efficiency of Reinforced Concrete Structures // Scientific Israel – Technological Advantages. Vol. 12. № 2.
2. CEB, CEB-FIP Model Code 1990 / CEB Bulletin d'Information № 213/214, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, Switzerland, 1993. 437 p.
3. Chiorino M.A. Analysis of structural effects of time – dependent behavior of concrete: an internationally harmonized format // Concrete and Reinforced concrete – Glance at Future. III All Russian (International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete, Moscow – 2014. Vol.7, plenary papers. P. 338—350.
4. fib, Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn.2013. 402 p.
5. ACI 209.3R-XX, Analysis of Creep and Shrinkage Effects on Concrete Structures, Final Draft, Chiorino M.A. (Chairm. of Edit. Team), ACI Committee 209. March 2011. 228 p.
6. Санжаровский Р.С., Манченко М.М. Ошибки в теории ползучести железобетона и современные нормы // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 3. – С. 25—32.
7. Sanjarovsky R., Manchenko M. Creep of concrete and its instantaneous nonlinearity of deformation in the structural calculations // Scientific Israel – Technological Advantages. 2015. Vol. 17. № 1-2. P. 180—187.
8. Sanjarovskiy R., Ter-Emmanuilyan T., and Manchenko M. (2015) Creep of Concrete and Its Instant Nonlinear Deformation in the Calculation of Structures. CONCREEP 10. P. 238—247.
9. International Organization for Standardization (1998) General Principles on the Reliability of Structures. ISO, Geneva, ISO 2934.
10. Designer's Guide to Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. General rules and rules for buildings and structural fire design. R. S. Narayanan and A. Beeby. 2005. 232 p.
11. Рыбнов Е., Санжаровский Р., Звездов А. Дефекты национальных стандартов по железобетону. Как их устранить в свете требований Еврокодов // Строительная газета. 2011. № 24. – С. 4—5.
12. Rybnov E, Sanzharovsky R., Figovsky O., Beilin D. On the Durability of Reinforced Concrete Structures // Scientific Israel – Technological Advantages. 2011. Vol. 13. № 4.

Поступила в редакцию 9 марта 2017 г. Прошла рецензирование 12 сентября 2017 г.

Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

САНЖАРОВСКИЙ РУДОЛЬФ СЕРГЕЕВИЧ окончил Ленинградский инженерно - строительный институт, д.т.н., профессор. Место работы: Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, главный научный сотрудник. Область научных интересов: разработка теории ползучести бетона с учетом мгновенной и длительной нелинейности, а также их учет в расчетах конструкций. Адрес: 010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2.

МАНЧЕНКО МАКСИМ МИХАЙЛОВИЧ окончил Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, к.т.н. Место работы: ФГУП «Крыловский научный центр», старший научный сотрудник. Область научных интересов: ползучесть бетона с учетом мгновенной и длительной нелинейности; прочность корпусных конструкций кораблей из полимерных композиционных материалов. Адрес: 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44

Для цитирования:

Санжаровский Р.С., Манченко М.М. Ошибки международных норм по железобетону и правила Еврокода // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 25—36. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-25-36.

References

1. Rybnov, E, Sanzharovsky R., Figovsky, O., Beilin, D. (2010) Durability and Efficiency of Reinforced Concrete Structures. *Scientific Israel– Technological Advantages*. Vol. 12, № 2.
2. CEB, CEB-FIP Model Code 1990? CEB Bulletin d'Information №213/214, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, Switzerland, 1993. 437 p.

3. Chiorino M.A. (2014) Analysis of structural effects of time – dependent behavior of concrete: an internationally harmonized format. *Concrete and Reinforced concrete – Glance at Future. III All Russian (International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*, Moscow, 2014, Vol.7, plenary papers. 338—350.
4. fib, Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013/ 402 p.
5. ACI 209.3R-XX, Analysis of Creep and Shrinkage Effects on Concrete Structures, Final Draft, Chiorino M.A. (Chairm. of Edit. Team), ACI Committee 209. March 2011. 228 p.
6. Sanjarovsky, R., Manchenko, M. (2016). Errors in the theory of creep of reinforced concrete and modern norms. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 3. 25—32. (In Russ.)
7. Sanjarovsky, R., Manchenko, M. (2015) Creep of concrete and its instantaneous non-linearity of deformation in the structural calculations. *Scientific Israel – Technological Advantages*. Vol. 17, № 1-2. 180—187.
8. Sanjarovskiy, R., Ter-Emmanuilyan, T., and Manchenko, M. (2015) Creep of Concrete and Its Instant Nonlinear Deformation in the Calculation of Structures. *CONCREEP 10*. P. 238—247.
9. International Organization for Standardization (1998) General Principles on the Reliability of Structures. ISO, Geneva, ISO 2934.
10. Designer’s Guide to Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. General rules and rules for buildings and structural fire design. R. S. Narayanan and A. Beeby. 2005. 232 p.
11. Rybnov, E, Sanzharovsky, R., Zvezdov, A. (2011). Defekty nacional'nyh standartov po zhelezobetonu. Kak ih ustranit' v svete trebovaniy Evrokodov. *Stroitel'naya gazeta*. № 24. 4—5. (In Russ.)
12. Rybnov, E, Sanzharovsky, R., Figovsky, O., Beilin, D. (2011) On the Durability of Reinforced Concrete Structures. *Scientific Israel – Technological Advantages*. Vol. 13. № 4.

ERRORS OF INTERNATIONAL STANDARDS ON REINFORCED CONCRETE AND RULES OF THE EUROCODE

R.S. SANZHAROVSKIY*, M. MANCHENKO**

*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

The proposed work identified and analyzed the errors in the theory of viscoelasticity of concrete in international norms for concrete and reinforced concrete, new equations of the theory of creep of concrete, taking into account the instant nonlinearity, nonlinear creep and inertial properties of concrete. The results of the study are brought to the charts and tables, convenient for use by ordinary designers. The article was written in accordance with the recommendations of the round table, held at RUDN University on June 9, 2016 under the guidance of Doctor of Technical Sciences, prof. S.N. Krivoshapko.

KEY WORDS: elastoplastic deformation of concrete, theory for concrete creep, sustained resistance of the building structures, modern building regulations.

Article history: Received: March 9, 2017. Revised: September 12, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors:

SANZHAROVSKIY RUDOLF graduated from Leningrad Institute of Construction Engineering; Grand Ph.D., Prof. Duty station: L.N.Gumilyov Eurasian National University, Principal Researcher. Research Interests: the development of the theory of creep of concrete with allowance for instantaneous and long-term nonlinearity, as well as their accounting in the calculations of structures. Address: 2 Mirzoyan str., Astana, 010008, Republic of Kazakhstan.

MANCHENKO MAXIM graduated from Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Ph.D. Duty station: Krylov State Research Centre, Senior Researcher. Research Interests: Creep of concrete taking into account instantaneous and long-term nonlinearity; strength of hull structures of vessels made of composite materials. Address: 44 Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation.

For citation:

Sanzharovskiy R.S., Manchenko M.M. (2017) Errors of international standards on reinforced concrete and rules of the Eurocode. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 25—36. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-25-36. (In Russ.)

УДК 624.012.045

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-37-44

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

А.И. ДЕМЬЯНОВ*, к.т.н., доцент

Вл. И. КОЛЧУНОВ*, д.т.н., профессор

А.А. ПОКУСАЕВ**, аспирант

*ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,

305040, Курск, ул. 50 Лет Октября, 94; vlik52@mail.ru

**Московский государственный университет путей сообщения Императора

Николая II, Институт пути, строительства и сооружений,

127055, Москва, Минаевский переулок, 2, fvs_Aleksej456@yandex.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций при сложном сопротивлении - кручении с изгибом, выполненные с целью выявления закономерностей и определения параметров деформирования и трещинообразования. Важнейшими из исследуемых параметров являлись: трещинообразующая нагрузка, разрушающая нагрузка, координаты образования пространственных трещин, ширина раскрытия этих трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры и вдоль всего профиля трещин; изменения расстояния между трещинами и длины трещин по мере увеличения нагрузки; деформации сжатого бетона и арматуры при сложном напряженно-деформированном состоянии. Результаты испытаний представлены в виде зависимостей прогибов конструкций, деформаций сжатого бетона и рабочей арматуры, в том числе, определенных по показаниям электрометрических розеток. Полученные зависимости позволяют оценивать достоверность разрабатываемых методов расчета железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, кручение, изгиб, экспериментальные исследования, деформации, трещиностойкость, сложное сопротивление

Актуальность задачи. Процесс сложного сопротивления – кручения с изгибом в железобетоне представляет достаточно сложное явление, для моделирования которого требуется привлечение ряда исходных гипотез, подтвержденных экспериментом. Эта задача в теории железобетона до настоящего времени остается одной из наименее изученных в теоретическом плане и тем более в части экспериментальной проверки имеющихся [1-4] и создаваемых [5-9] расчетных моделей. В то же время, практическое использование железобетонных конструкций во все более сложных и ответственных зданиях и сооружениях сегодня вызывает необходимость развития теории и совершенствования методов расчета железобетонных конструкций при таких напряженных состояниях.

Уместно также заметить, что в любом конструктивном элементе, работающем на изгиб, может возникать кручение за счет случайного эксцентриситета, обусловленного внецентренным приложением вертикальной нагрузки, неоднородностью материалов неоднородностью материалов, асимметрией сечения.

На сегодняшний день, существует целый класс железобетонных конструкций (Г-образные рамы при действии ветровой нагрузки, опоры ЛЭП при одностороннем обрыве проводов, балки с боковыми консолями, наклонные арки и т.п.), в которых неучет кручения в расчетах может привести к обрушению конструкций, а в некоторых случаях обрушению и всего здания. Проведенные в зарубежных странах (США, Канаде и др.) ассоциацией портландцемента обследования зданий и сооружений выявили целый ряд случаев аварий, связанных с неверной оценкой сложного сопротивления железобетона. Неоспоримым явля-

ется и тот факт, что сопротивление трещинообразованию пространственных трещин в железобетонных конструкциях само по себе явление достаточно сложное, а в условиях сложного кручения с изгибом – оно еще более усложняется.

Проведенные до настоящего времени лишь в единичных случаях и с ограниченным количеством изучаемых параметров экспериментальные исследования железобетонных конструкций при действии кручения с изгибом дают крайне ограниченную, а иногда и противоречивую информацию о их напряженно-деформированном состоянии, трещиностойкости, координатах пространственных трещин. Не изучены возникающие при этом эффекты, связанные с нарушением сплошности железобетона. Практически отсутствуют опытные данные о длине и приращениях трещин при увеличении ступени нагружения. В то же время, отмеченные другие параметры являются определяющими для анализа сопротивления областей, прилегающих к зонам пересечения трещинами рабочей арматуры, где, как показали последние исследования [4-6 и др.], возникает эффект нарушения сплошности бетона. Как показали опыты, влияние этого эффекта на равновесие усилий в поперечном сечении по результатам исследований проф. В.М. Бондаренко, Вл. И. Колчунова [4], может достигать 40%.

Попытки разработки более совершенных расчетных моделей для решения задач образования различных типов пространственных трещин на нижней и боковой грани железобетонных конструкций при кручении с изгибом были сделаны в работах [6–10]. В развитие этих исследований, в настоящей работе приведены методика и результаты экспериментальных исследований для проверки предложенных расчетных моделей железобетона.

Методика исследований. Проведенные экспериментальные исследования были направлены на определение основных параметров железобетонных конструкций при изгибе с кручением: нагрузки образования пространственных трещин $R_{sup,cr}$, разрушающей нагрузки $R_{sup,w}$, координат образования пространственных трещин, фактической высоты сжатой зоны бетона x_{fact} в поперечном сечении, проходящим через конец пространственной трещины; прогибы конструкций; ширина раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры вдоль всего профиля трещин; изменения расстояния между трещинами l_{cr} и длины трещин h_{cr} по мере увеличения нагрузки и др.

Измерение названных опытных характеристик проводилось механическими, оптическими и тензометрическими приборами, устанавливаемыми на опытных конструкциях. В частности, для измерения перемещений опытных конструкций использовались прогибомеры с ценой деления 0,01 мм (рис. 1). Деформации арматуры измерялись специальными устройствами, включавшими гайки, приваренные к рабочей арматуре, на которые перед бетонированием балок, одевались специальные резиновые трубки, а торцы гаек закрывались пластилином с целью исключения влияния окружающего бетона на положение «гаек» при деформациях. При измерении деформаций арматуры в эти гайки вкручивались штанги, на которые крепились индикаторы с ценой деления 0,001 мм на базе 250 мм.

Деформации бетона измерялись отдельными тензорезисторами и розетками тензорезисторов. В процессе кратковременного нагружения отсчеты по тензорезисторам и по механическим приборам снимались дважды: сразу после приложения нагрузки и после временной выдержки.

С помощью микроскопа МПБ-2 с 24-х кратным увеличением и ценой деления 0,05 мм изучалась растянутая зона каждой конструкции. Появление и дальнейшее распространение трещин тщательно фиксировалось на специальных

планшетах. По мере дальнейшего нагружения проводилось наблюдение за появлением новых трещин и развитием уже имеющихся. Замерялась ширина раскрытия трещин на двух боковых гранях в уровнях, расположенных выше оси арматуры на 20 и 30 мм.

Методика экспериментальных исследований предусматривала установку четырех групп электротензорезисторов на опытные конструкции. Электротензо-

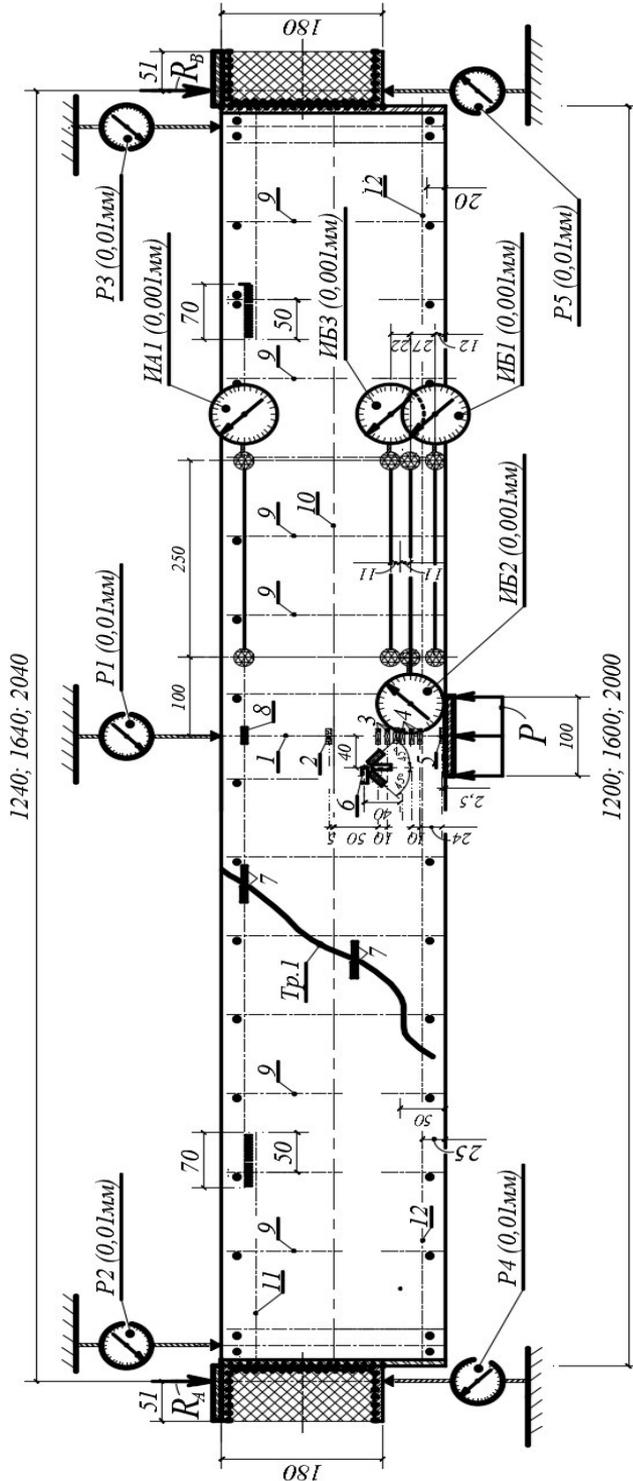


Рис. 1. Схема расположения механических приборов и электротензорезисторов, установленных на опытных конструкциях:

1 – вертикальная ось симметрии образца; 2 – электротензорезисторы, расположенные сверху от нейтральной оси 10; 3 – то же, расположенные в зоне сжатого бетона; 4 – то же, в зоне, прилегающей к нейтральной оси; 5 – электротензорезисторы, расположенные на фибре бетона; 6 – розетка электротензорезисторов, расположенная на удалении 40 мм от вертикальной оси образца 1; 7 – электротензорезисторы, расположенные на берегах появившейся трещины; 8 – то же, на уровне оси растянутой арматуры; 9 – ось вертикальных арматурных стержней; 10 – средняя ось балки; 11 – ось растянутой арматуры; 12 – ось сжатой арматуры

резисторы *первой* группы (см. рис. 1) устанавливались по высоте поперечного сечения экспериментальных конструкций основных серий в фибровых волокнах, в местах расположения нулевой точки, т. е. перехода от удлинения к укорочению.

Изучение распределения деформаций по всей высоте сжатой зоны, определение размеров сжатой зоны и фактической высоты развития трещин стало возможным благодаря установке электротензорезисторов, цепочкой по высоте образцов. Обеспечение надежности и дополнение опытной информации осуществлялось установкой на опытных конструкциях групп розеток, располагаемых в двух одинаково напряженных симметричных относительно вертикальной оси балки сечениях. Электротензорезисторы *второй* группы устанавливались на берегах, образующихся при нагружении трещин на уровне оси растянутой арматуры.

Для повышения надежности экспериментальных данных предусматривалось дублирование работы электротензорезисторов (там, где это было возможно) механическими приборами - индикаторами с ценой деления 0,001мм, устанавливаемыми на базе 250 мм (см. рис. 1).

Конструкции опытных образцов, их маркировка, схемы армирования и схемы нагружения были подробно описаны в работе [11].

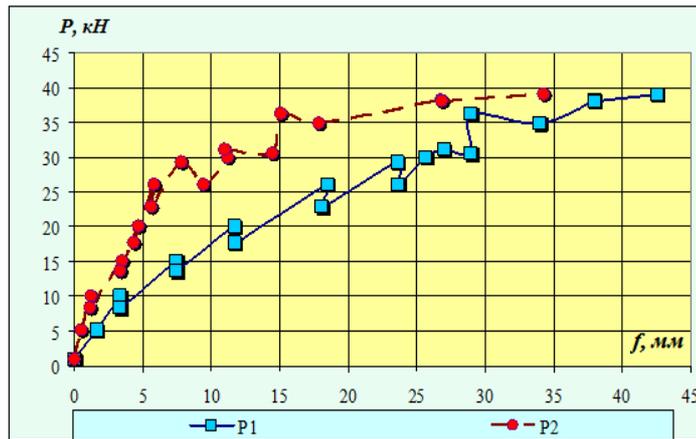


Рис. 2. Зависимости «нагрузка-прогиб» в опытной конструкции балки КИП-II-1,6

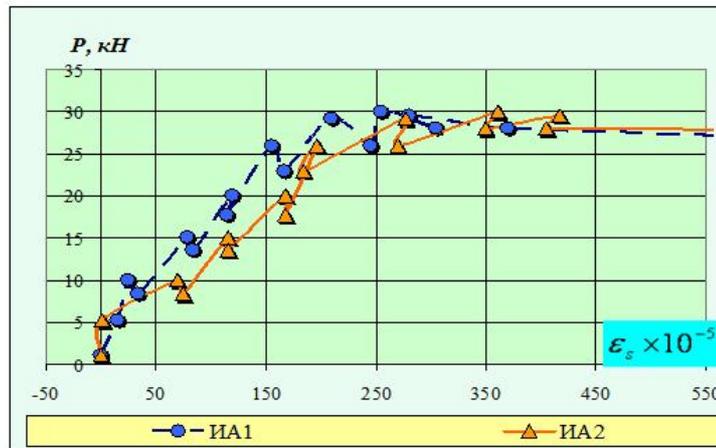


Рис. 3. Зависимости «нагрузка-деформация» рабочей арматуры опытной конструкции КИП-II-1,6

Результаты исследований. Полученные опытные данные о деформировании железобетонных балок при кручении с изгибом позволяют отметить следующее.

Прогибы опытных балок шифра КИП-II-1,6 (К-кручение, И-изгиб, II – прямоугольное сечение, 1,6 – длина конструкции в метрах) с относительно невысоким уровнем нагружения имели ярко выраженный нелинейный характер (рис. 2). При этом по графикам деформаций рабочей арматуры (рис. 3) не сложно проследить начало и развитие трещинообразования в конструкциях балок. Были получены также опытные значения деформаций бетона по тензорезисторам и розеткам тензорезисторов установленным по высоте среднего поперечного сечения опытных конструкций. Графики деформаций полученных по конкретным тензорезисторам (R5-R8) на различных этапах нагружения для одной из опытных конструкции (КИП-II-1,6) приведены на рис. 4.

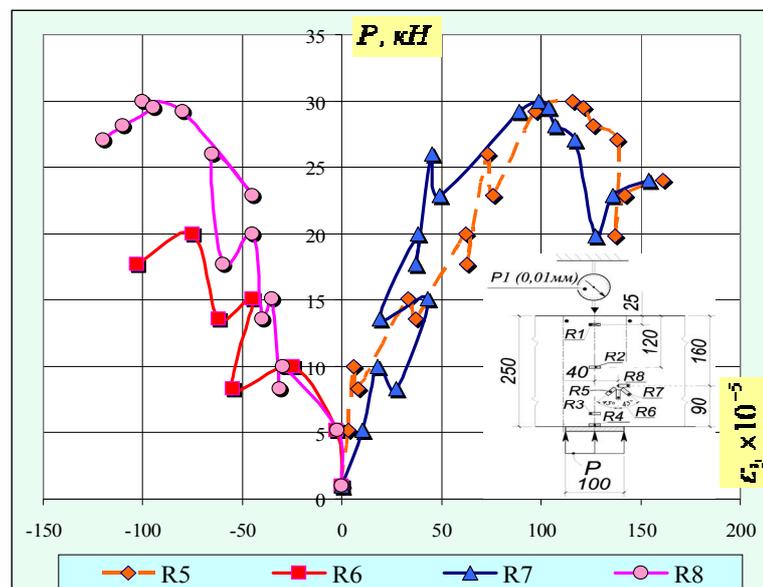


Рис. 4. Графики зависимости деформаций бетона по показаниям розетки тензорезисторов в опытной конструкции КИП-II-1,6

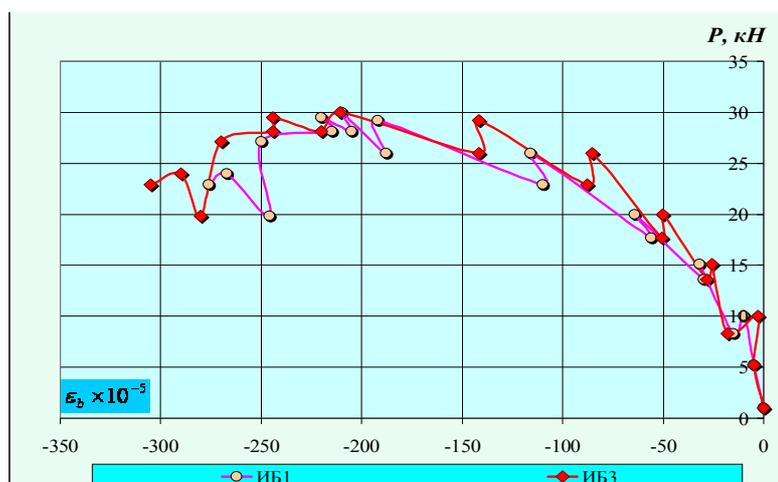


Рис. 5. Графики зависимости опытных деформаций бетона в опытной конструкции КИП-II-1,6

Помимо тензометрии, достоверность этих деформаций контролировались механическими приборами (индикаторами, ИБ, см. рис. 1), результаты измерений, которые приведены на рис.5. Не сложно видеть, что в диапазоне деформаций $\varepsilon = 0 - 100 \cdot 10^{-5}$ имеется удовлетворительное количественное согласование измеренных значений деформаций по показаниям тензорезистров и индикаторов.

Экспериментальными исследованиями были определены и ряд других параметров характеризующих особенности деформирования и трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом, в их числе координаты образования пространственных трещин и ширина их раскрытия, изменения расстояния между трещинами и длины трещин в процессе нагружения, и ряд других. Эти данные планируется представить в последующих публикациях авторов.

Полученные экспериментальные зависимости дают достаточно полное представление о закономерностях деформирования и предельных значениях нагрузки для сложно напряженных железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

Вывод. Предложенная методика экспериментальных исследований и полученные результаты испытаний опытных конструкций железобетонных балок при сложном сопротивлении дают возможность проверки достоверности рабочих гипотез и разрабатываемых расчетных моделей деформирования железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

© Демьянов А.И., Колчунов Вл.И., Покусаев А.А. 2017

Список литературы

1. Верюжский Ю.В., Гольшев А.Б., Колчунов Вл. И., Ключева Н.В., Лисицин Б.М., Машков И.Л., Яковенко И.А. Справочное пособие по строительной механике. В двух томах. Том I: Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2014. – 640 с.
2. Гольшев А.Б. Сопротивление железобетона [Текст]: монография / А.Б. Гольшев, Вл. И. Колчунов. – К.: Основа, 2009. – 432 с.
3. Карпенко Н.Н., Елагин Э.Г. Деформации железобетонных трубчатых элементов при изгибе с кручением // Прочность и жесткость железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1971. – С. 29-48.
4. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона: монография. М.: АСВ, 2004. – 472с.
5. Ключева Н.В., Яковенко И.А., Усенко Н.В. К расчету ширины раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 2. – С. 8–11.
6. Salnikov A., Kolchunov Vl., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending (2015), Applied Mechanics and Materials. Vols. 725-726 (2015), pp. 784–789.
7. Сальников А.С., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №3. – С. 35–40.
8. Сальников А.С., Колчунов Вл. И., Колчунов В. И. Методика расчета предельной нагрузки и координат образования пространственной трещины первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2015. №6(62). – С. 49– 56.
9. Колчунов Вл.И., Рыпаков Д.А. Моделирование пространственной трещины в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 5. – С. 11–16.
10. Сальников А.С., Ключева Н.В., Колчунов Вл.И. Метод определения минимальной нагрузки и координат образования пространственной трещины в железобетонных кон-

струкциях при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. – С. 52–57.

11. Колчунов В.И., Сальников А.С. Экспериментальные исследования трещинообразования в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом// Строительство и реконструкция. 2016. №3(65). – С. 24– 32.

Поступила в редакцию 2 июня 2017 г. Прошла рецензирование 12 октября 2017 г.
Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

ДЕМЬЯНОВ АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ, к.т.н., доцент кафедры "Промышленное и гражданское строительство, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет». Научные интересы: исследования железобетонных конструкций при сложном сопротивлении, конструктивная безопасность строительных систем из железобетона и других нелинейно деформируемых материалов, экспериментальные исследования железобетонных конструкций, компьютерные технологии расчетного анализа зданий и сооружений, 305040, Курск, ул. 50 Лет Октября, 94; sprescotranu@gmail.com

КОЛЧУНОВ Владимир Иванович, д.т.н., профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет». Научные интересы: строительная механика, строительные конструкции, теория железобетона, экспериментальные исследования строительных конструкций, физические и математические модели механики сооружений, 305040, Курск, ул. 50 Лет Октября, 94; vlik52@mail.ru

ПОКУСАЕВ Алексей Александрович, аспирант, Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, Институт пути, строительства и сооружений. Научные интересы: теоретические и экспериментальные исследования конструкций зданий и сооружений, моделирование железобетонных конструкций, испытания железобетонных конструкций с элементами сплошного и составного сечения, 127055, Москва, Минаевский переулок, 2, fvs_Aleksej456@yandex.ru

Для цитирования:

Демьянов А.И., Колчунов В.И., Покусаев А.А. Экспериментальные исследования деформирования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 37—44. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-37-44

References

1. Veryuzhskiy, Yu. V., Golyshchev, A. B., Kolchunov, V. I., Klyueva, N. V., Lisitsin, B. M., Mashkov, I. L., Yakovenko, I. A. (2014). Spravochnoe posobie postroitel'noy mekhanike [Reference Manual on Building Mechanics], Tom I: Uchebnoe posobie, ASV Publ., Moscow. 640 p. (In Russ.)
2. Golyshchev, A. B. (2009). Soprotivlenie Zhelezobetona [Resistance of Reinforced Concrete]: monography, Osnova Publ., Kiev. 432 p. (In Russ.)
3. Karpenko, N. N., Elagin, E. G. (1971). Deformatsii Zhelezobetonnnykh Trubchatykh Elementov pri Izgibe s Krucheniem. Prochnost' i Zhestkost' Zhelezobetonnnykh Konstruktsiy [Durability and rigidity of reinforced concrete structures]. NIIZhB Gosstroya SSSR, Moscow. P. 29—48. (In Russ.)
4. Bondarenko, V. M., Kolchunov, V. I. (2004). Raschetnye Modeli Silovogo Soprotivleniya Zhelezobetona [The computational model of power resistance of reinforced concrete], ASV Publ. Moscow. 472 p. (In Russ.)
5. Klueva, N. V., Yakovenko, I. A., Usenko, N. V. (2014). K raschetu Shiriny Raskrytiya Naklonnykh Treshchin Tre'tego Tipa v Sostavnykh Zhelezobetonnnykh konstruktsiyakh, Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. No. 2. P. 8—11. (In Russ.)
6. Salnikov, A., Kolchunov, V. I., Yakovenko, I. (2015). The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 725–726. P. 784—789.
7. Salnikov, A. S., Kolchunov, V. I., Yakovenko, I. A. (2015). Raschetnaya model' obrazovaniya prostranstvennykh treshchin pervogo vida pri kruchenii s izgiбом. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. No. 3. P. 35—40. (In Russ.)
8. Salnikov, A. S., Kolchunov, V. I., Kolchunov, V. I. (2015). Metodika rascheta predel'noy nagruzki i koordinat obrazovaniya prostranstvennoy treshchiny pervogo vida v zhelezobetonnnykh konstruktsiyakh pri kruchenii s izgiбом. *Building & Reconstruction*. No 6(62). P. 49—56. (In Russ.)
9. Kolchunov, V. I., Rypakov, D. A. (2016). Modeling of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 5. P. 11—16. (In Russ.)

10. Salnikov, A.S., Klueva, N.V., Kolchunov, V.I. (2016). The method for determining minimum load and the coordinates of the spatial crack formation in reinforced concrete structures under torsion with bending. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. Vol. 1. P. 52—57. (In Russ.)

11. Kolchunov, V.I., Sal'nikov, A.S. (2016). Experimental research of crack appearance in reinforced concrete structures under torsion with bending. *Building & Reconstruction*. No 3(65). P. 24—32.

EXPERIMENTAL STUDIES OF DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TORSION AND BENDING

A.I. DEMYANOV*, V.I. KOLCHUNOV*, A.A. POKUSAEV**

*Southwest state university, Kursk, Russia

**Moscow State University of Railway Engineering (MIIT),

**Institute of Railways, Construction and Structures, Russia

The results of experimental studies of reinforced concrete constructions at complex resistance to torsion with bending are shown in the article. The main purposes of the researches are detection of regularities and determination of deformation and cracking parameters. The most important of the studding parameters are cracking load, destructive load, the coordinates of spatial cracks formation, the width of crack's opening at the axis of the longitudinal and transverse tensile reinforcement and along the entire profile of cracks; changing the distance between the cracks and crack length according to increasing the deformation load; deformation of compressed concrete and reinforcement in a complex stress-strain state. The test results are presented in the form of relationships of structure's deflections, deformations of compressed concrete and reinforcement, including results which were determined by the indications of electrotensometric sockets. The obtained relationships allow us to assess the reliability of the calculating methods reinforced concrete constructions subjected the action torsion and bending.

Keywords: reinforced concrete, torsion, bending, experimental studies, deformations, crack resistance, complex stress state.

Article history: Received: June 2, 2017. Revised: October 12, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors:

DEMYANOV ALEKSEJ IVANOVICH, candidate of technical sciences, associate professor of the department of industrial and civil engineering. Scientific interests: the study of composite structures in complex resistance, the study of the survivability of structural systems and reinforced concrete and other non-linearly deformed materials, experimental studies in reinforced concrete structures, computer technologies for computational analysis of buildings and structures, South-West State University, 305040, Kursk, St. 50 Years of October, speccompany@gmail.com

KOLCHUNOV VLADIMIR IVANOVICH, doctor of technical sciences, Professor of the department of industrial and civil engineering. Scientific interests: building mechanics, building structures, reinforced concrete theory, experimental studies of building structures, physical and mathematical models of structures, 305040, Kursk, St. 50 Years of October, vlik52@mail.ru

POKUSAEV ALEXEI ALEXANDROVICH, graduate student, Moscow State University of Communications, Emperor Nicholas II, Institute of Ways, Construction and Structures. Scientific interests: theoretical and experimental studies of the survivability of buildings and structures, modeling of reinforced concrete structures, testing of reinforced concrete structures with solid and composite element, 127055, Moscow, Minaevsky pereulok, 2, fvs_Aleksei456@yandex.ru

For citation:

Demyanov A.I., Kolchunov V.I., Pokusaev A.A. (2017) Experimental studies of deformation of reinforced concrete structures subjected torsion and bending. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 37—44. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-37-44. (In Russ.)

ДЛИТЕЛЬНОЕ СИЛОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. БОНДАРЕНКО*, доктор технических наук, профессор, академик РААСН

К.П. ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ**, доктор технических наук, с.н.с.

*НИИСФ РААСН, 127238, Москва, Локомотивный пр-д 21

**АО «НИЦ «Строительство», 109428, Москва, 2-я Институтская, 6

Исследуется связь уровня нагружения с механическими характеристиками структурированных материалов и впервые вводится единое аналитическое описание ползучести для стадий устойчивого затухающего во времени деформирования, устойчивого состояния и неустойчивого критического деформирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ползучесть материалов, кинетика деформирования.

Экспериментально установлено, что силовые деформационные характеристики структурированных конструктивных материалов зависят от уровня, режима и продолжительности нагружения, а также возраста, влажности, температуры и масштабного фактора (Описанное типично для бетона и древесины).

С ростом напряжений сжатые материалы вначале уплотняются, их прочность увеличивается, деформативность уменьшается, а при дальнейшем увеличении напряжений структурные связи разрушаются, возникают трещины и изломы, а деформативность увеличивается, вплоть до неустойчивого лавинного развития. А.А. Гвоздев [5] и Н.Л. Леонтьев [8] ограничивают стадию устойчивого развития деформаций области напряжений $\sigma < R_{дл}$. Соответствующие графики деформирования представлены на рис. 1 и 2 [6,7].

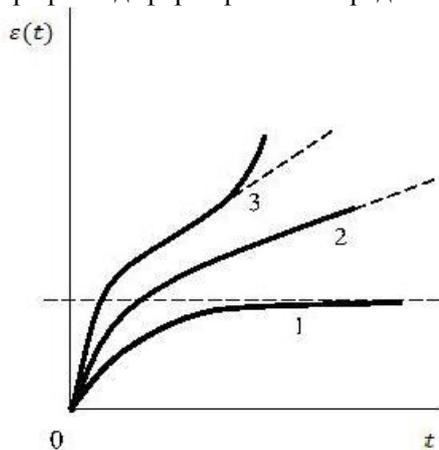


Рис. 1. Кривые длительных деформаций при постоянной нагрузке разного уровня (1-устойчивое, затухающее во времени деформирование, 2 - безразличное деформирование, 3-неустойчивое деформирование)

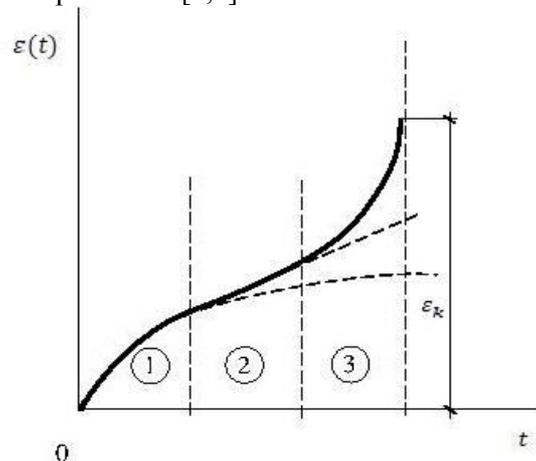


Рис. 2. Кривые длительных деформаций при увеличивающейся во времени нагрузке (1 - стадия нелинейного затухающего состояния, 2 - стадия устойчивого состояния, 3 - стадия лавинного деформирования)

В публикациях существует линейное постадийное аналитическое описание развития деформации ползучести, предложенное А.Р. Ржаницыным [10]:

а) в интегральных соотношениях

1. первая стадия:
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{H} + \int_{-\infty}^t \sigma(\tau) K_1(t - \tau) d\tau,$$

2. вторая стадия:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{H} + \int_{-\infty}^t [a_1 + \sigma(t)] K_2(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

3. третья стадия:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{H} + \int_{-\infty}^t [a_2 + \sigma(t)] K_2(t - \tau) d\tau,$$

где K_1, K_2 и K_3 – постадийные функции влияния:

$$K_1(t - \tau) = \frac{H-E}{nH^2} e^{-\frac{E(t-\tau)}{nH}}; \quad K_2(t - \tau) = \frac{1}{nH}; \quad K_3(t - \tau) = \frac{n+E}{nH^2} e^{-\frac{F(t-\tau)}{nH}}, \quad (2)$$

$$a_1 = -\sigma_T; \quad a_2 = -\frac{2\sigma_T H}{H + F}$$

б) в дифференциальных соотношениях:

1. первая стадия: $nH\dot{\varepsilon} + \varepsilon E = n\dot{\sigma} + \sigma,$
2. вторая стадия: $nH\dot{\varepsilon} = n\dot{\sigma} + \sigma - \sigma_T,$
3. третья стадия: $nH\dot{\varepsilon} - F\varepsilon = n\dot{\sigma} + \sigma - 2\sigma_T.$ (3)

Границы между стадиями, устанавливаемые из условия неразрывности между первой и второй стадиями: $\varepsilon = \frac{\sigma_T}{E} = const,$

а между второй и третьей стадиями:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_T}{F} = const, \quad (4)$$

H, E, F, n, σ_T – некоторые эмпирические положительные постоянные.

В целом задача сводится к поиску указанных постоянных и последовательных приближений, данное предложение не получило широкого применения. Интересы практического применения привели к принципиально другому решению задачи, к поиску единого выражения для всех стадий, т.е. в целом для всего процесса деформирования. Такое решение получено в [2]. Для этого применяется прием оценки относительного дефицита меры ползучести:

$$\Delta C(t, t_0) = \frac{C(\infty, t_0) - C(t, t_0)}{C(\infty, t_0)} \quad (5)$$

и вводится, согласованное с предложением Гольберга-Вааге, нелинейное представление связи этого дефицита со скоростью его изменения:

$$\frac{d[\Delta C(t, t_0)]}{dt} = -\alpha [\Delta C(t, t_0)]^m \quad \text{при} \quad 0 \leq m \leq 1, \quad (6)$$

где α и m – эмпирические параметры.

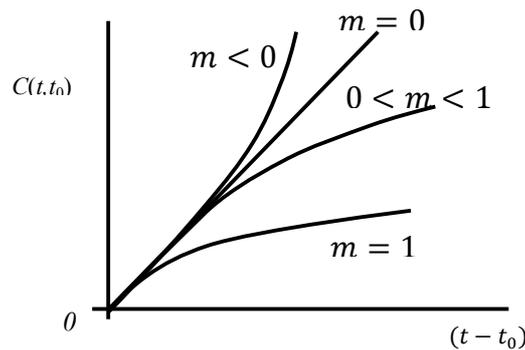


Рис. 3. Схема зависимости меры ползучести от величины m

Обработка экспериментов В.П. Селяева и К.П. Пятикрестовского привели к записям:

а) для бетонов [4]:

$$m \left(\frac{\sigma}{R_{\partial t}} \right) = \sum_{i=0}^{i=2} q_{mi} \left(\frac{\sigma}{R_{\partial t}} \right)^i, \quad (7)$$

где q_{mi} – опытные величины, зависящие от класса бетона;
 б) для древесины [1,9]

$$m\left(\frac{\sigma}{R_{дл}}\right) = 2,0 - 1,33\left(\frac{\sigma}{R_{дл}}\right). \quad (8)$$

Решение (6) приводит при $m \geq 0$ в стадию нелинейно развивающихся и затухающих деформаций при $m = 0$ в стадию устойчивого развития деформаций при $m < 0$ в стадию неустойчивого критического состояния, в частности, иллюстративно при $m \neq 1$:

$$C(t, t_0) = \left\{ 1 - (-1[(-m) + 1] \alpha (t - t_0))^{\frac{1}{(-m)+1}} \right\} C(\infty, 28), \quad (9)$$

при $m = 1$:

$$C(t, t_0) = [1 - e^{-\alpha(t-t_0)}] C(\infty, 28), \quad (10)$$

при $m = 0$:

$$C(t, t_0) = [1 + \alpha(t - t_0)] C(\infty, 28). \quad (11)$$

При этом заметим, что случай $m = 1$ соответствует общеизвестной записи для меры ползучести, общепринятой для исходных работ по теории ползучести (схематично рис. 3).

Таким образом, иллюстрируется связь решения уравнения (6) с уровнем действующих нагружений и показана его общность. Дальнейшее использование полученных результатов может быть осуществлено в рамках обычной теории ползучести.

© Бондаренко В.М., Пятикрестовский К.П. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. *Белянкин Ф.П., Яценко В.П.* Деформативность и сопротивление древесины как упруго-вязко-пластического тела. – Киев: Изд-во АН СССР, 1957. – 200 с.
2. *Бондаренко В.М., Ягунов Б.А.* К вопросу о расчетной оценке ползучести бетона// Академия. Архитектура и строительство, №3, Москва: РААСН, 2006. – С. 73—78.
3. *Бондаренко В.М.* Силовое деформирование, коррозионные повреждения, энергосопротивление железобетона// Курск: Изд. Юго-западного государственного университета, 2016. – 67 с.
4. *Бондаренко В.М., Римшин В.И.* Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. – Москва: Изд-во «Студент», 2015. – 114 р.
5. *Гвоздев А.А.* Ползучесть бетона и пути ее исследования// Сб.: Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов, Москва: Стройиздат, 1955. – С. 126—137.
6. *Гвоздев А.А. и др.* Прочность, структурные изменения и деформации бетона. – Москва: Стройиздат, 1978. – 132 р.
7. *Иванов Ю.М.* Основные вопросы изучения ползучести древесины// Сб.: Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных конструкций. – Москва: Стройиздат, 1950. – С. 100—115.
8. *Леонтьев Н.Л.* Длительное сопротивление древесины. – Москва: Госбумиздат, 1957. – 131 с.
9. *Пятикрестовский К.П.* Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций. – Мин. образования и науки Рос. Федерации. – Москва: МГСУ, 2014. – 320 с.
10. *Ржаницын А.Р.* Разработка основ общей теории ползучести// Сб.: Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов. – Москва: Стройиздат, 1955. – С. 100—116.

Поступила в редакцию 2 апреля 2017 г. Прошла рецензирование 28 мая 2017 г.

Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

БОНДАРЕНКО ВИТАЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, главный научный сотрудник НИИСФ. Научные интересы: строительная механика, железобетонные конструкции. Количество опубликованных работ – более 300. Адрес: 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, НИИСФ РААСН.

ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ КОНСТАНТИН ПАНТЕЛЕЕВИЧ, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (АО «НИЦ «Строительство»). Научные интересы: строительная механика, деревянные конструкции. Опубликовал более 140 научных работ. Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6. E-mail: stroymex@list.ru.

Для цитирования:

Бондаренко В.М., Пятикrestовский К.П. Длительное силовое деформирование структурированных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 45—48. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-45-48.

References

1. Belyankin, F.P., Yatzenko, V.P. (1957) *Deformativnost i Soprotivlenie Drevesiny* [Deformation and Resistance of Wood]. Kiev: Izd. AN SSSR. 200 p. (In Russ.)
2. Bondarenko, V.M., Yagupov, B.A. (2006) On problem of design evaluation of creep. *Akademiya. Arhitektura i Stroitel'stvo*, No 3, Moscow: RAASN. 73—78. (In Russ.)
3. Bondarenko, V.M. (2016) *Force Deforming, Corrosion Damages, Electric Resistance of Reinforced Concrete*. Kursk: South-West State University. 67 p. (In Russ.)
4. Bondarenko, V.M., Rimshin, V.I. (2015) *Dissipative Theory of Force Resistance of Reinforced Concrete*. Moscow: Izd. "Student". 114 p. (In Russ.)
5. Gvozdev, A.A. (1955) Creeping of concrete and the ways of its research. *Issledovanie Prochnosti, Plastichnosti, i Polzuchesti Stroit. Materialov*, Moscow: Stroyizdat, 126—137. (In Russ.)
6. Gvozdev, A.A. et al (1978) *Prochnost, Strukturnie Izmeneniya i Deformatzii Betona* [Strength, Structural Modifications, and deformations of Concrete]. Moscow: Stroyizdat. 132 p. (In Russ.)
7. Ivanov, Yu.M. (1950) The general problems of researching of creep of wood. *Issledovanie Prochnosti, Plastichnosti, i Polzuchesti Stroit. Materialov*, Moscow: Stroyizdat. P. 100—115. (In Russ.)
8. Leont'ev, N.L. (1957) *Dlitel'noe Soprotivlenie Drevesiny*. Moscow: Gosbumizdat. 131 p. (In Russ.)
9. Pyatikrestovskiy K.P. (2014) *Nelineynie Metody Mehaniki v Proektirovanii Sovremennykh Derevyannykh Konstruktziy* [Non-linear methods of mechanics in design of modern wooden structures]. Moscow: MGSU. 320 p. (In Russ.)
10. Rzhantzin, A.R. (1955) Development of the basis of general theory of creep. *Issledovanie prochnosti, Plastichnosti, i Polzuchesti Stroit. Materialov*, Moscow: Stroyizdat. 100—116. (In Russ.)

SUSTAINED FORCE DEFORMING OF STRUCTURED MATERIALS

* V.M. BONDARENKO, ** K.P. PYATIKRESTOVSKIY

*The Scientific-and-Research Institute of Building Physics (NIISF), Moscow, Russia

**TzNIISK named after V.A. Kucherenko (AO "NITz "Stroitel'stvo"), Moscow, Russia

Relationship between value of loading and mechanical characteristics of structured materials is explored. A uniform analytical description of creep for stages of stable deformation, damped at time, stable and unstable critical deforming are introduced into practice for the first time.

Keywords: creep of materials, kinetics of deforming.

Article history: Received: April 2, 2017. Revised: May 28, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors:

BONDARENKO VITALIY MIHAILOVICH, member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), DSc, Professor, chief research worker of the Scientific-and-Research Institute of Building Physics. Scientific interests: structural mechanics, reinforced concrete structures. He has published 300 scientific works. Post address: 21, Lokomotivniy proezd, Moscow, 127238, Russian Federation.

PYATIKRESTOVSKIY KONSTANTIN PANTELEEVIICH, DSc, senior research worker, TzNIISK named after V.A. Kucherenko (AO "NITz "Stroitel'stvo"). Scientific interests: structural mechanics, wooden structures. He has published 140 scientific works. Post address: 6, 2-ya Institutskaya ul., Moscow, 109428, Russian Federation. Email address: stroymex@list.ru.

For citation:

Bondarenko V.M., Pyatikrestovskiy K.P. (2017) Sustained force deforming of structured materials. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 45—48. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-45-48. (In Russ.)

Численные методы расчета конструкций

УДК 539.3:534.1

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-49-54

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТЬЮ ПРИ СОСРЕДОТОЧЕННОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.К. МУСАЕВ^{*,**}, доктор технических наук, профессор,

^{*}Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Россия;

tusayev-vk@yandex.ru

^{**}Московский политехнический университет,

107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, Россия; *tusayev-vk@yandex.ru*

В работе приводится некоторая информация моделирования безопасности упругой полуплоскости при нестационарном волновом взрывном воздействии с помощью метода конечных элементов. Рассматривается волновая теория взрывной безопасности. Применяется техническое средство в виде вертикальных прямоугольных полостей для увеличения безопасности объекта при сосредоточенном вертикальном взрывном воздействии. Получена явная двухслойная схема. Рассмотрена постановка задачи с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем) в полуплоскости при воздействии в виде дельта функции. Решается система уравнений из 59048 неизвестных. Взрывное воздействие моделируется в виде треугольного импульса. В пяти точках приводится изменение контурного напряжения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, компьютерное моделирование, вычислительная механика, нестационарные упругие волны, динамика сплошных сред, волновая теория взрывной безопасности, фундаментальное воздействие, метод Галеркина, распространение волн, вертикальные прямоугольные полости, полуплоскость, неотражающие граничные условия, дельта функция, переходной процесс

Волны напряжений различной природы, распространяясь, в деформируемом теле взаимодействуют, друг с другом. При интерференции волн напряжений их интенсивности складываются. Они могут достигать значений, превосходящих предел прочности материала. В этом случае наступает разрушение материала. После трехкратного или четырехкратного прохождения и отражения волн напряжений в теле процесс распространения возмущений становится установившимся, напряжения и деформации усредняются, тело находится в колебательном движении.

Некоторая информация о рассматриваемом численном методе, алгоритме и комплексе программ моделирования нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых телах приведена в работах [1, 2, 5, 7, 8].

В работах [2, 3, 4, 7] приведена некоторая информация о физической достоверности и математической точности моделирования нестационарных волн напряжений в деформируемых телах различной формы с помощью рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений при различных (ударных, взрывных и сейсмических) воздействиях с помощью рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ приведено в работах [5, 6, 7, 8].

Для решения задачи о моделировании упругих нестационарных волн напряжений в деформируемых областях сложной формы рассмотрим некоторое тело Γ в прямоугольной декартовой системе координат XOY , которому в

начальный момент времени $t = 0$ сообщается механическое нестационарное импульсное воздействие. Предположим, что тело Γ изготовлено из однородного изотропного материала, подчиняющегося упругому закону Гука при малых упругих деформациях.

Точные уравнения двумерной (плоское напряженное состояние) динамической теории упругости имеют вид;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (x, y) \in \Gamma, \\ \sigma_x &= \rho C_p^2 \varepsilon_x + \rho(C_p^2 - 2C_s^2) \varepsilon_y, \quad \tau_{xy} = \rho C_s^2 \gamma_{xy}, \\ \sigma_y &= \rho C_p^2 \varepsilon_y + \rho(C_p^2 - 2C_s^2) \varepsilon_x, \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial X}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial Y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X}, \quad (x, y) \in (\Gamma \cup S), \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_x , σ_y и τ_{xy} – компоненты тензора упругих напряжений; ε_x , ε_y и γ_{xy} – компоненты тензора упругих деформаций; u и v – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно; ρ – плотность материала; $C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$ – скорость продольной упругой волны; $C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$ – скорость поперечной упругой волны; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости, $S (S_1 \cup S_2)$ – граничный контур тела Γ .

Принимая во внимание определение матрицы жесткости, вектора инерции и вектора внешних сил для тела Γ , записываем приближенное значение уравнения движения в теории упругости:

$$\bar{H}\ddot{\bar{\Phi}} + \bar{K}\bar{\Phi} = \bar{R}, \quad \bar{\Phi}|_{t=0} = \bar{\Phi}_0, \quad \dot{\bar{\Phi}}|_{t=0} = \dot{\bar{\Phi}}_0, \quad (2)$$

где \bar{H} – диагональная матрица инерции; \bar{K} – матрица жесткости; $\bar{\Phi}$ – вектор узловых упругих перемещений; $\dot{\bar{\Phi}}$ – вектор узловых упругих скоростей перемещений; $\ddot{\bar{\Phi}}$ – вектор узловых упругих ускорений; \bar{R} – вектор внешних узловых упругих сил.

Соотношение (2) – система линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка в перемещениях с начальными условиями. Таким образом, с помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями (1) привели к линейной задаче Коши (2). Для интегрирования уравнения (2) конечноэлементным вариантом метода Галеркина приведем его к следующему виду:

$$\bar{H} \frac{d}{dt} \dot{\bar{\Phi}} + \bar{K}\bar{\Phi} = \bar{R}, \quad \frac{d}{dt} \bar{\Phi} = \dot{\bar{\Phi}}. \quad (3)$$

Интегрируя по временной координате соотношение (3) с помощью конечноэлементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную конечноэлементную линейную схему в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек:

$$\dot{\bar{\Phi}}_{i+1} = \dot{\bar{\Phi}}_i + \Delta t \bar{H}^{-1} (-\bar{K}\bar{\Phi}_i + \bar{R}_i), \quad \bar{\Phi}_{i+1} = \bar{\Phi}_i + \Delta t \dot{\bar{\Phi}}_{i+1}, \quad (4)$$

где Δt – шаг по временной координате.

Основные соотношения метода конечных элементов в перемещениях получены с помощью принципа возможных перемещений и конечноэлементного варианта метода Галеркина.

Общая теория численных уравнений математической физики требует для этого наложение определенных условий на отношение шагов по временной координате Δt и по пространственным координатам, а именно

$$\Delta t = 0,5 \frac{\min \Delta l_i}{C_p} \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (5)$$

где Δl – длина стороны конечного элемента.

Для исследуемой области, состоящей из материалов с разными физическими свойствами, выбирается минимальный шаг по временной координате (5).

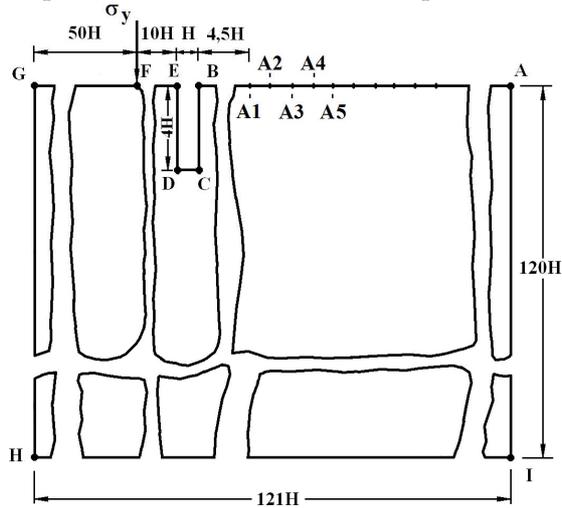


Рис. 1. Постановка задачи о воздействии сосредоточенной взрывной волны на свободной поверхности упругой полуплоскости с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем)

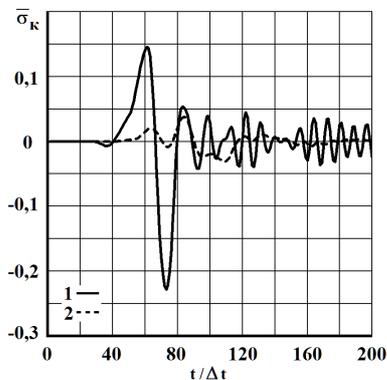


Рис. 2. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке $A1$: 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем)

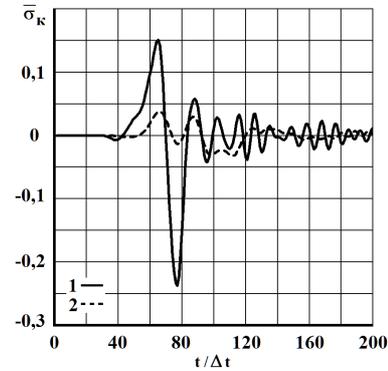


Рис. 3. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке $A2$: 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем)

Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с). Для перехода в другие единицы измерения были приняты следующие допущения: $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,1 \text{ МПа}$; $1 \text{ кгс}^2/\text{см}^4 \approx 10^9 \text{ кг/м}^3$. Рассмотрим задачу о воздействии сосредоточенной взрывной волны на свободной поверхности упругой полуплоскости с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем) (рис. 1).

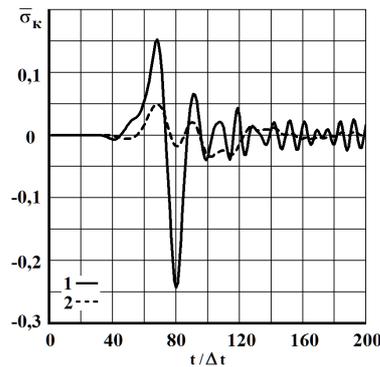


Рис. 4. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке $A3$: 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем)

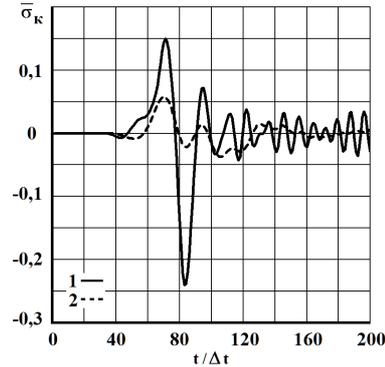


Рис. 5. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке $A4$: 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем)

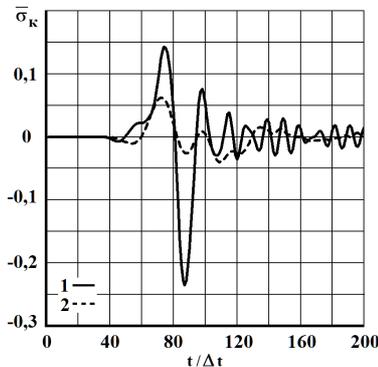


Рис. 6. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке $A5$: 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем)

Рис. 6. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке $A5$: 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем)

На рис. 2-6 приведены контурные напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени n , которые получены в точках $A1 - A5$.

Выводы

1. Для оценки несущей способности и прогноза безопасности уникальных сооружений при взрывных воздействиях применяется численное моделирование. На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны методика, алгоритм и комплекс программ для решения линейных двумерных плоских задач, которые позволяют решать сложные задачи при взрывных воздействиях на сооружения. Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений. Матрица упругости выражена через скорость продольных волн, скорость поперечных волн и плотность.

2. Линейная динамическая задача с начальными и граничными условиями в виде дифференциальных уравнений в частных производных, для решения задач при взрывных воздействиях, с помощью метода конечных элементов в перемещениях приведена к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, которая решается по явной двухслойной схеме.

3. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о физической достоверности результатов численного решения полученных, с помощью метода конечных элементов в перемещениях, при решении задач о распространении взрывных волн в деформируемых телах.

4. Решена задача о воздействии сосредоточенной взрывной волны на свободной поверхности упругой полуплоскости с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем). Решается система уравнений из 59048 неизвестных. Рассматриваются точки на свободной поверхности упругой полуплоскости.

5. Полученные результаты показывают уменьшение напряжений при приращении полости с соотношением ширины к высоте один к четырем.

6. Полученные результаты можно оценить как первое приближение к решению сложной комплексной задачи, о применении полостей для увеличения безопасности уникальных объектов по несущей способности (прочности) при взрывных воздействиях, с помощью численного моделирования волновых уравнений теории упругости.

© Мусаев В.К. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых областях с помощью метода конечных элементов в перемещениях // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 12 (1). – С. 28—32.

2. Мусаев В.К. Оценка достоверности численного моделирования нестационарных упругих волн напряжений в областях сложной формы // Материалы Всероссийской конференции «Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы». – М.: ИПРИМ РАН, 2015. – С. 94—103.

3. Акатьев С.В., Куранцов В.А., Денисенков А.Н., Черникова Н.Г., Кормилицин А.И. Сопоставление результатов численного метода Мусаева В.К. в перемещениях с интерференцией плоских продольных упругих волн напряжений в виде дельта функции // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение: Т38. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XIV. В 3 т. – Том 2. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2012. – С. 270—278.

4. Мусаев В.К., Дикова Е.В., Кормилицин А.И., Самойлов С.Н., Стародубцев В.В. Достоверность результатов численного метода в перемещениях при отражении упругих волн напряжений в виде треугольного импульса от свободной поверхности пластинки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2016. – № 4. – С. 57—61.

5. Мусаев В.К. Численное моделирование нестационарных волн напряжений в упругой полуплоскости с полостью (соотношение ширины к высоте один к четырем) при сосредоточенном взрывном воздействии // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 11-2. – С. 192—196.

6. Стародубцев В.В. Моделирование безопасности сосредоточенного нестационарного упругого взрывного воздействия на надземный нефтепровод с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В.К. // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXIV Международной конференции. – М.: РГГУ, 2016. – С. 251—254.

7. Musayev V.K. Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Vol. 11, Iss. 1. – P. 135—146.

8. Musayev V.K. Mathematical modeling of seismic nonstationary elastic waves stresses in Kurpsai dam with a base (half-plane) // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – Vol. 12, Iss. 3. – P. 73—83.

Поступила в редакцию 15 ноября 2016 г. Прошла рецензирование 12 мая 2017 г.

Принята к публикации 18 июля 2017 г.

Об авторе: МУСАЕВ ВЯЧЕСЛАВ КАДЫРОВИЧ, доктор технических наук, профессор. Преподаёт одновременно в Московском государственном университете путей сообщения им. Императора Николая II, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Россия; и Московском политехническом университете, 107023, Москва, ул. Б. Семеновская, 38, Россия. Научные интересы: динамика сплошных сред, волновая теория взрывной безопасности, численное моделирование.

Для цитирования: Мусаев В.К. Численное моделирование нестационарных волн напряжений в упругой полуплоскости с прямоугольной полостью при сосредоточенном вертикальном взрывном воздействии // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 49—54. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-49-54.

References

1. Musaev, V.K. (2014). Modelirovanie nestacionarnykh uprugih voln naprjazhenij v deformiruemykh oblastjakh s pomoshh'ju metoda konechnykh jelementov v peremeshhenijah. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*. 12 (1). 28—32. (In Russ.)
2. Musaev, V.K. (2015). Ocenka dostovernosti chislenного modelirovanija nestacionarnykh uprugih voln naprjazhenij v oblastjakh slozhnoj formy. *Materialy Vserossijskoj konf. «Mehanika i nanomehanika strukturno-slozhnyh i geterogennyh sred. Uspehi, problemy, perspektivy»*, М.: IPRIM RAN. 94—103. (In Russ.)
3. Akat'ev, S.V., Kurancov, V.A., Denisenkov, A.N., Chernikova, N.G., Kormilicin, A.I. (2012). Sopostavlenie rezul'tatov chislenного metoda Musaeva V.K. v peremeshhenijah s interferenciej ploskih prodol'nykh uprugih voln naprjazhenij v vide del'ta funkcii. *Tehnosfernaja bezopasnost', nadezhnost', kachestvo, jenergo i resursobezpechenie: T38. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. Vypusk XIV. V 3 t. Tom 2. Rostov-na-Donu: RGSU. 270—278. (In Russ.)
4. Musaev, V.K., Dikova, E.V., Kormilicin, A.I., Samojlov, S.N., Starodubcev, V.V. (2016). The accuracy of the numerical method results in the displacement in the elastic reflection of stress waves in the form of a triangular pulse from the free surface of the plate. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, No 4. 57—61. (In Russ.)
5. Musaev, V.K. (2016). Chislenное modelirovanie nestacionarnykh voln naprjazhenij v uprugoj poluploskosti s polost'ju (sootnoshenie shiriny k vysote odin k chetyrem) pri sosredotochenном vzryvном vozdejstvii. *Mezhdunarodnyj Zhurnal Jeksperimental'nogo Obrazovanija*. No 11—2. 192—196. (In Russ.)
6. Starodubcev, V.V. (2016). Modelirovanie bezopasnosti sosredotochenного nestacionarnого uprugogo vzryvного vozdejstvija na nadzemnyj nefteprovod s pomoshh'ju chislenного metoda, algoritma i kompleksa programm Musaeva V.K. *Problemy Upravljenija Bezopasnost'ju Slozhnyh Sistem*. Materialy XXIV Mezhdunarodnoj konferencii, Moscow: RGGU. 251—254. (In Russ.)
7. Musayev, V.K. (2015). Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, Vol. 11, Iss. 1. 135—146.
8. Musayev, V.K. (2016). Mathematical modeling of seismic nonstationary elastic waves stresses in Kurpsai dam with a base (half-plane). *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, Vol. 12, Iss. 3. 73—83.

NUMERICAL SIMULATION OF TRANSIENT STRESS WAVES IN ELASTIC HALF PLANE WITH A RECTANGULAR CAVITY WHILE CENTERING THE VERTICAL EXPLOSIVE IMPACT

V.K. MUSAYEV

The paper provides some information modeling safety elastic half plane in the case of non-stationary wave explosive impact using the finite element method. Considered the wave theory of explosive safety. Applicable technical tool in the form of vertical rectangular cavities to increase the security of the object when focused vertical explosive impact. The explicit two-layer scheme. Reviewed the problem statement with the cavity (ratio of width to height of one to four) in a half-plane when exposed in the form of Delta functions. Solve the system of equations of 59048 unknown. Explosive impact is modeled as a triangular pulse. Five points is a change in the grid voltages.

KEY WORDS: numerical simulation, computer simulation, computational mechanics, non-stationary elastic waves, dynamics of continuous media, the wave theory of explosive safety, fundamental effect, the method of Galerkin, wave propagation, vertical rectangular cavity, the half-plane, non-reflecting boundary conditions, the Delta function.

Article history: Received: November 15, 2016. Revised: May 12, 2017. Accepted: July 18, 2017.

For citation: Musayev V.K. (2017) Numerical simulation of transient stress waves in elastic half plane with a rectangular cavity while centering the vertical explosive impact. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 49—54. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-49-54. (In Russ.)

Расчет подземных сооружений

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-55-67

**ПАРАМЕТРЫ ПОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ РУД**

Ю.И. РАЗОРЕНОВ, доктор техн. наук, профессор,
Б.В. ДЗЕРАНОВ, канд. геол.- мин. наук, доцент,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (СКГТУ), Владикавказ,
362021, Россия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

В работе обозначена концепция сохранения земной поверхности от разрушения, реализуется путем регулирования напряжений согласованием процессов выемки руды во времени и пространстве по критерию минимизации напряжений. Обоснование технологических решений, обеспечивающих сохранность массива и земной поверхности над ним за счет феномена остаточной прочности нарушенных пород, является целью статьи. Цель достигается в ходе анализа практики горных работ, установленных закономерностей поведения массивов с дискретным гравитационно тектоническим структурным полем напряжений и методов обеспечения их устойчивости путем создания условий для заклинивания пород в пределах свода естественного равновесия. Показано, что геомеханическая сбалансированность дискретных породных сред обеспечивается за счет остаточной несущей способности природно и технологически разрушенных пород. Предложено решение задачи профилактики критических напряжений и соответствующих им деформаций разделением шахтного поля на участки с плоской кровлей, в пределах которых могут быть применены минимизированные по затратам технологии. Рекомендовано дополнить критерий оптимальности погашения величиной компенсации наносимого ущерба окружающей среде. Дана типизация выработок по устойчивости и нарушенности массивов. Сформулировано условие прочности массива на различных стадиях существования условие геомеханической сбалансированности геомеханической системы. По устойчивости в зависимости от размеров структурных блоков пород в кровле выработки могут быть типизированы. Предложена новая классификация технологий погашения пустот с учетом феномена заклинивания породных блоков. За счет остаточной несущей способности природно и технологически разрушенных пород при подземной разработке месторождений возникают породные конструкции, свойства которых корректируются разделением шахтного поля на геомеханически сбалансированные участки с плоской кровлей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геомеханика, порода, несущая способность, напряжения, деформации, плоская кровля, технология.

Введение

Обеспечение потребностей человеческого общества в минеральном сырье формирует перед горным производством новые проблемы взаимоотношения технологических процессов и сохранения окружающей среды [1-4].

О масштабах воздействия горного производства можно судить по тому, что из земных недр извлекается около 200 видов полезных ископаемых, а годовой объем мировой добычи минерального сырья достигает 17-18 млрд. тонн горной массы. Наиболее проблемным подземным способом добывают две трети руд цветных и редких металлов, более 50 % руд горной химии, около 60 % угля, около 100% калийных солей.

В России на разведку и добычу полезных ископаемых расходуется до 40 % капиталовложений, треть производственных и около 20 % трудовых ресурсов. Управление горным давлением как совокупность мероприятий по предотвращению неуправляемых процессов развития напряжений и деформаций состоит

в использовании, в числе прочих, технологических решений, использующих феномен остаточной несущей способности разрушенных пород.

Одним из основных вопросов эксплуатации месторождений полезных ископаемых является выбор параметров погашения пустот, образованных выемкой сырья.

Критерием эффективности управления состоянием массива являются приведенные затраты на погашение пустот. По этому критерию из применяемых способов управления массивом предпочтительно обрушение пород. Однако, этот способ предполагает ошибку при оценке затрат, поскольку действительная стоимость отвлекаемых земель, минерального сырья и изменение экологической обстановки не могут быть оценены достоверно.

Концепция сохранения земной поверхности от разрушения реализуется путем регулирования напряжений согласованием процессов выемки руды во времени и пространстве. На этой основе разработаны природоохранные и ресурсосберегающие технологии, которые дали положительные результаты при подземной разработке сложно-структурных месторождений [5-8].

Цель

Среди негативных форм воздействия горных работ на окружающую среду приоритетно разрушение земной поверхности, в результате чего зона разрушения вступает в контакт с зоной жизнедеятельности и обитания флоры, фауны и человека (рис. 1) [9-10].

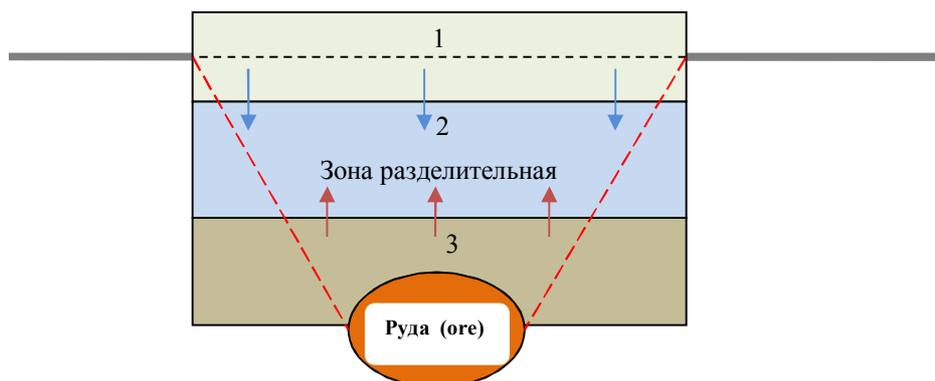


Рис. 1. Влияние горных работ на зону жизнедеятельности: 1- зона жизнедеятельности; 2- зона разделительная; 3- зона разрушения

Fig. 1. The impacts of mining operations on the area of life: 1 - area of activity; 2 - the zone of separation; 3 - zone of destruction

Геомеханическая сбалансированность напряженно - деформированных дискретных сред обеспечивается, в том числе, за счет использования остаточной несущей способности природно и технологически разрушенных пород. Разрушенный массив не всегда обрушается, используя остаточную несущую способность, которая реализуется в форме консолидации структурных отделеностей, поэтому целью управления состоянием массива разрабатываемого месторождения является выбор таких решений, которые сохраняли бы его и земную поверхность над ним от разрушения, используя феномен создания несущих породных конструкций.

Материалы и методы

Месторождения металлических руд залегают в неоднородных массивах сложной структуры, поведение которых определяет экономические, экологические и социальные последствия разработки, поэтому создание и внедрение научно – методических предпосылок управления неоднородными

скальными массивами представляет собой важную научную и практическую задачу.

При исследовании закономерностей поведения массивов используют системный подход, содержащий анализ результатов аналогичных работ, натурные исследования с помощью маркшейдерских съемок, разгрузки массива, измерений деформаций скважин; лабораторные – с помощью моделирования на эквивалентных, оптико-поляризационных и электропроводящих материалах; теоретические с использованием метода конечных элементов и др.

Закономерности поведения напряженно-деформированных горных пород при образовании в них пустот установлены работами В.Д. Слесарева (1948), С.В. Ветрова (1975), К.В. Руппенейта, Г.Л. Фисенко (1976) и др.

Методы расчета геомеханических процессов в массивах с дискретным гравитационно тектонически-структурным полем напряжений даны в трудах А.А. Борисова, Г.Н. Кузнецова, С.В. Ветрова. Работами Н.В. Баклашова, И.М. Петухова, Л.Г. Протосени и др. обосновано использование остаточной несущей способности нарушенных пород.

Управление состоянием массивов с обеспечением их устойчивости путем заполнением пустот твердеющими закладочными смесями разработано трудами Д.М. Бронникова (1973), М.И. Цыгалова (1985), Н.Ф. Замесова (1973), Л.А. Крупника (1986), А.П. Требукова (1981) и др.

М.М. Протодяконов (1933) обосновал, что на горную выработку действует только масса пород в пределах свода с высотой значительно меньшей глубины работ. В. Д. Слесарев (1948) в качестве устойчивости выработки сопротивление разрыву горных пород в кровле; А.А. Борисов (1964) увязал теорию с устойчивостью слоя пород в кровле выработки. С.В. Ветров (1975) увязал устойчивость выработки с прочностью заклинивающихся в пределах шарнирной арки пород в пределах свода естественного равновесия [11].

Результаты и обсуждение

В зависимости от механизма работы напряжений и деформаций в массиве выработки в нарушенных горными работами породах ведут себя по одному из типов (табл.1).

Таблица1 [Table1]

Типизация выработок по устойчивости [Typing the workings on the stability]

Тип [Type]	Признак Sign	Устойчивость выработок Stability of openings
Первый [First]	Деформации пород не превышают предела упругости Deformation of rocks not exceed the elastic limit of the	Устойчивы всегда Sustainable always
Второй [Second]	Обеспечивается самозаклинивание структурных блоков в несущем слое кровли выработки Provided samosoglasovannye structural blocks in the bearing layer of the roof production	Средней устойчивости при условии неперевышения предельных размеров Average resistance under the condition not exceeding the size limits
Третий [Third]	Дискретные несвязанные породы без заклинивания в кровле Discrete unrelated breed without jamming in the roof	Всегда неустойчивы Always unstable

Несущая способность дискретных пород корректируется технологией разработки. Радикальным способом управления массивом является создание равнопрочных по сравнению с извлекаемыми породами искусственных массивов.

В массивах скальных месторождениях вертикальные напряжения искажаются действием тектонических сил. Горизонтальные напряжения ослабляются или разгружаются в заполняющем трещины материале. Разрушение хрупких пород в зонах ослабленности массива происходит в форме раскрытия структурных нарушений с образованием блоков, которые ведут себя как жесткие тела с упругим контактированием.

Условие прочности системы на различных стадиях существования массива описывается моделью [12]:

$$\sigma_1 \pm k\sigma_{2,3} \leq \sigma_{сж} = \begin{cases} \sigma_{сж}^0 = \int_0^{Z_0^{max}} fx(dx_1, dx_2 \dots dx_n) \rightarrow \begin{cases} \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0^{max}} fx(dH_S) \\ \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0^{max}} fx(dH_S + dH_C) \end{cases} \\ \sigma_{сж}^{ост} \text{ при } H_C = H \rightarrow \sigma_{закл} = \int_0^B fx(dH) \end{cases}$$

где σ_1 - вертикальная составляющая главных напряжений; $\sigma_{2,3}$ - горизонтальная составляющая главных напряжений, МПа; k - параметр степени искажения напряжения структурно-тектоническими условиями; $\sigma_{сж}$ - напряжения в верхнем слое пород, МПа; $\sigma \pm$ - напряжения в зоне влияния очистных работ, МПа; $\sigma_{сж}^{ост}$ - остаточная прочность разупроченных пород, МПа; Z_0 - пролет, при котором сохраняется плоская форма обнажения, м; x_1, \dots, x_n - характеристики материала структурных блоков; $\sigma_{закл}$ - прочность сжатию закладочного массива, МПа; B - ширина зоны обрушения; H - высота зоны обрушения, м; H_C - высота зоны влияния очистных работ, м; H_S - высота закладки, м.

Таблица 2 [Table 2]

Типизация нарушенности массивов [Typing of the original arrays]

Зоны Zone	Характер деформирования The nature of deformation	Прочность массива The strength of the array
Природно- и технологически разрушенные породы Natural and technologically ruined rocks	Минимальная связь структурных отдельных частей между собой A minimal link between the structural parts of a	Минимальная прочность, неустойчивость выработок The minimum strength, the instability of mine workings
Природно- и технологически ослабленные породы Natural and technologically loosened rocks	Контактирование структурных отдельных частей между собой и образование конструкций при условии не превышения предельных размеров Contacting structural parts of each other and the formation of structures under the condition not exceeding the size limits	Средняя прочность, средняя устойчивость выработок Average strength, average resistance workings
Нетронутые породы Untouched breed	Взаимодействие структурных отдельных частей в условиях объемного сжатия The interaction of structural parts under conditions of volumetric compression	Максимальная прочность, определяемая пределом прочности при сжатии Maximum strength determined by the tensile strength under compression

Условие геомеханической сбалансированности системы "нетронутый массив - нарушенный массив – искусственный массив":

$$\sigma_1 \pm k\sigma_{2,3} \leq \sigma_{сж} = \begin{cases} \sigma_{сж}^0 = \int_0^{Z_0^{\max}} f(x)(dx_1, dx_2 \dots dx_n) \rightarrow \begin{cases} \sigma_{закл} = k_{упр} \int_0^{Z_0^{\max}} f(x)(dH_S) \\ \sigma_{закл} = k_{упр} \int_0^{Z_0^{\max}} f(x)(dH_S + dH_C) \end{cases} \\ \sigma_{сж}^{ост} \text{ при } H_C = H \rightarrow \sigma_{закл} = k_{упр} \int_0^B f(x)(dH) \end{cases}$$

где $k_{упр}$ - коэффициент упрочнения массива при объемном сжатии.

Деформирование, разрушение и перемещение массива представляет собой следствие внутреннего взаимодействия элементарных минеральных частиц, осложненного анизотропностью среды. В зависимости от деформирования пород в массиве одновременно сосуществуют несколько областей разрушения. Вблизи разлома возникает зона нарушенных пород с минимальной несущей способностью, которую сменяют зоны ослабленных, а затем нетронутых пород (табл. 2). Разрушение массива открывает пути миграции жидких и газообразных продуктов горного производства, создавая опасность для окружающей среды (рис.2) [13-14].

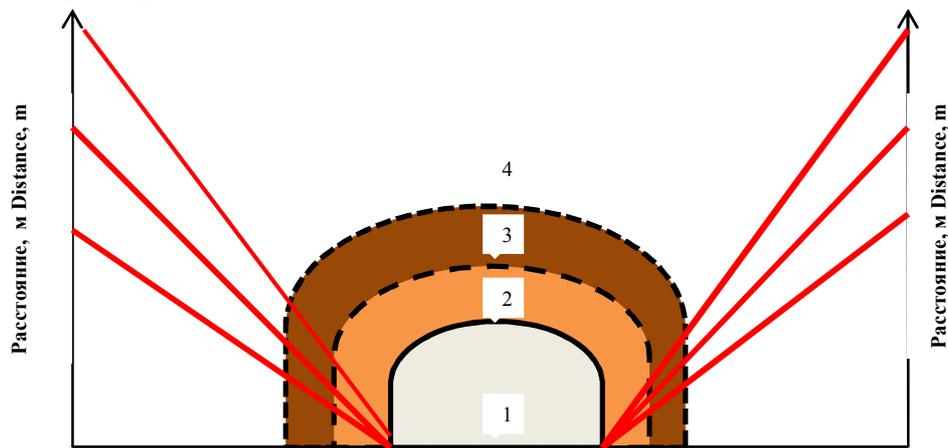


Рис. 2. Изменение напряжений в окрестностях выработки: 1 – выработка; 2 – зона максимальных напряжений; 3 – зона минимальных напряжений; 4 – зона нетронутых пород
Fig. 2. The voltage changes in the vicinity of the production: 1 – production; 2 – zone of maximum stress; 3 – zone of minimal stress; 4 – zone of intact rocks

Максимальная сохранность массива и горных выработок обеспечивается при минимизации объемов первых двух зон и увеличении доли допредельного деформирования:

$$s_{сжм}(t) = k_t [s_{сжд} + (s_{сжм} - s_{сжд})] e^{-at},$$

где $\sigma_{сж.м.}$ - предел мгновенной прочности при одноосном сжатии, МПа; $\sigma_{сж.д.}$ - предел длительной прочности при одноосном сжатии, МПа; k_t - коэффициент тектонической нарушенности; a - параметр аппроксимации; t - время.

При моделировании процессов разрушения скальных массивов их состояние описывается условием [15]:

$$\sigma \cdot K_s = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f(x)(dx_1, dx_2 \dots dx_n) \rightarrow \Pi, R = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f \cdot x(dh_s + dh_n)$$

где σ - напряжения в зоне влияния выработок, МПа; K_s - коэффициент корректировки напряжений; l_{\max}, l_{\min} - пролеты обнажения пород, м; $x_1 \dots x_n$ - технологические, физико-механические и иные характеристики; Π - потери руд, доли

ед.; R – разубоживание руд породами, доли ед.; h_3 – высота закладочного массива, м; h_n – высота влияния горных выработок, м.

Степень безопасности технологий по развитию критических напряжений и деформаций оценивается коэффициентом K_1 :

$$K_1 = f(V_o - V_3; K_m),$$

где V_o - объем образованных в массиве пустот, м³; V_3 - объем заполненных закладкой пустот, м³; K_m - коэффициент доли твердеющей закладки.

По устойчивости в зависимости от размеров структурных блоков пород в кровле выработки могут быть типизированы в рамках табл. 3.

Таблица 3 [Table 3]

Типизация выработок по устойчивости [Typing the workings on the stability]

Масштаб структурных геологических нарушений The scale of the structural faults	Размеры и характер взаимодействия пород The size and nature of the interaction of rocks	Устойчивость горных выработок The stability of mine workings
Крупные и средние разломы Large and medium faults	Блоки превышают размеры выработки, заклинивание пород вне выработки Units exceed the sizes of the opening, jamming rocks production	Максимальная независимо от технологических процессов Maximum independently of the technological processes
Мелкие разломы и крупные трещины Small cracks and large cracks	Блоки соизмеримы с размерами выработки, заклинивание пород в кровле выработки The units commensurate with the sizes of the opening, jamming of rocks in the roof of the mine working	Средняя с зависимостью от технологических процессов The average dependence of technological processes
Средние и мелкие трещины Medium and small cracks	Мелкие блоки без заклинивания между собой Small blocks without locking with each other	Минимальная всегда Minimum always

Устойчивость массива обеспечивается назначением параметров, при которых напряжения в элементах системы не превышают критических и не сопровождаются критическими деформациями. Эта задача решается разделением шахтного поля на геомеханически сбалансированные участки, в пределах которых могут быть применены минимизированные по затратам технологии [16].

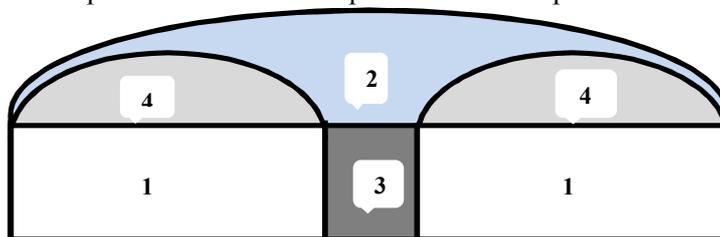


Рис. 3. Уменьшение высоты свода обрушения разделением массива: 1-выработка; 2- первичный свод естественного равновесия; 3- разделяющий массив; 4- вторичный свод естественного равновесия

Fig. 3. Reducing height of the arch collapse of the separation of the array: 1-development; 2- the primary set of natural balance; 3 - divide the array; 4 - secondary arch natural equilibrium

Методы определения устойчивости пролетов кровли различаются в зависимости от представления о строении пород (табл.4).

Методы расчета устойчивых пролетов обнажений кровли
Methods of calculating spans of sustainable outcrops of the roof

Характеристики массива Features of array		Методы Methods			Основные показатели Main indicators
		На основе классической механики On the basis of classical mechanics	На основе прикладной механики On the basis of applied mechanics		
			несущий элемент кровли bearing roof element	гипотеза горного давления hypothesis of mining pressure	
Квазисплошной в гравитационном поле Quasispace in a gravitational field	Изотропный isotropic	Механика сплошной среды Continuum mechanics	Плита или балка Plate or beam	Свод давления В.Д. Слесарев, Свод обрушения М.М.Протодаьяконов, И.М. Цимбаревич, Н.М. Покровский, и др. The pressure arch V. D. Slesarev, Arch collapse M. M. Protodyakonov, I. M. Tsybarevich, N. M. Pokrovsky, etc.	Свойства пород, анизотропия, структурное ослабление, мощность несущего элемента Properties of rocks, anisotropy, structural weakening, the power of the carrier element
	анизотропный anisotropic				
Сплошной нарушенный в грави-тектоструктурном поле Solid violated in gravity-tekto-structural field	Изотропный isotropic		Плита или балка с трещинами Plate or beam with cracks	Система столбов с трещиной Posts system with crack	
	Анизотропный anisotropic				
Дискретный с грави-тектоструктурным полем With discrete gravity-tekto-structural field	изотропный или анизотропный isotropic or anisotropic	Механика дискретной среды Mechanics of discrete environment	Плита или балка Plate or beam	Зоны обрушений А.А. Борисов, Свободные консоли Г.Н. Кузнецов Zone of collapses A.A. Borisov, Free console G.N. Kuznetsov	Структурное ослабление, размеры отдельностей, прочность Structural weakening, sizes, strength

Состояние окружающей среды в районе подземных работ корректируется целенаправленным использованием природных и технологических условий эксплуатации месторождений. Затраты на сохранение земной поверхности сокращают рациональным использованием свойств пород и закономерностей системы природно- техногенной среды [17-18].

Если в ранней истории горного дела обрушение земной поверхности при добыче минерального сырья считалось неизбежным, то в новое время развитие природоохранных тенденций породило технологии с закладкой пустот сухой, гидравлической, глиняной и, наконец твердеющей смесью.

Погашение пустот твердеющей закладочной смесью характеризуется высокой стоимостью, доходящей до 2/3 себестоимости добычи, поэтому стараются применять менее затратные варианты управления массивом: обрушением вмещающих пород; изоляцией пустот; закладкой твердеющей закладочной смесью меньшей прочности и др.

Погашение обрушением вмещающих пород является исторически первым способом. Значительные потери и разубоживание, а также опасность разрушения поверхности ограничивают возможность его применения при разработке месторождений, особенно ценных руд.

Погашение изоляцией пустот перемычками без заполнения материалом применяют при отработке рудных тел, не оказывающей существенного влияния на земную поверхность. Минимальные потери и разубоживание, доступность для контроля и возможность корректировки параметров процессов делают его предпочтительным при отработке рудных тел малой и средней мощности.

Погашение твердеющей закладочной смесью применяют при разработке мощных крутопадающих рудных тел, при одновременной отработке открытым и подземным способом, а также по экологическим соображениям. В условиях трехстороннего объемного сжатия прочность закладки увеличивается, сокращая расход дефицитных компонентов при оптимальном соотношении вертикальной нагрузки и бокового подпора.

Состояние напряжений и деформаций в массиве горных пород оценивается методами разгрузки, электрометрического, гамма и акустического каротажа и др. Смещения и параметры разрушения пород измеряют визуально, маркшейдерскими и геофизическими методами.

В результате развития напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг образованных пустот возникают зоны трещиноватости или нарушенности пород, характеризующихся резким снижением прочности.

В зоне нарушенных скальных пород коэффициент ослабления снижается от 0,250,35 до 0,04...0,15. Мощность зоны ослабления вокруг выработок составляет от 0,5...2,0 м до 5...10 м. Внутри зон приконтурная зона имеет величину от 0,04...1,10 до 0,10...0,15, что по сравнению с ненарушенным массивом означает уменьшение прочности от 1,5...2,5 до 2,5...6,0 раз. Вокруг пустот формируется зона неупругих деформаций, в которых протекают пластические деформации и разрушение пород, определяющие поведение массивов.

Для безопасности труда и качества добываемых руд важно, чтобы кровля выработок сохраняла плоскую форму, т. е. растягивающие и сжимающие напряжения не были критическими. Плоская форма пролета определяется способностью структурных блоков к заклиниванию в нижнем слое:

$$L_{\text{пред}} = 2d_2 \sqrt{\frac{10R_{\text{см}}}{K_2 \gamma d_1}},$$

где d_1 и d_2 – соответственно, горизонтальный и вертикальный размеры структурных блоков, м; K_2 – коэффициент запаса.

Эта формула отличается отсутствием параметра глубины разработок:

$$L_{\text{пред}} / 2 = d_1 \left(\frac{10R_{\text{сж}}}{K \gamma H} - 1 \right),$$

где K – коэффициент запаса устойчивости свода:

$$K = \frac{20R_{\text{сж}} d_1}{(L_{\phi} + 2d_1)H},$$

где L_{ϕ} – фактический пролет выработок.

При обрушении с образованием свода земная поверхность не разрушается при условии: $H' > h_a = h_c$, где H' – фактическая глубина верхней границы пустот от границы выветренных пород и рыхлых отложений, м.

При несоблюдении условия земная поверхность может быть сохранена закладкой пустот так, чтобы при уменьшенной высоте выработанного пространства условие обеспечивалось.

При малых размерах структурных блоков высота обрушения определяется коэффициентом разрыхления пород:

$$h_{oc} = \frac{\kappa' V'}{(K_p - 1) S_{nl}},$$

где h_{oc} – высота зоны опасных сдвижений, м; V' – объем пустот, м³; S_{nl} – площадь выработанного пространства в плане, м²; K_p – коэффициент разрыхления пород; κ' – коэффициент, равный 1,5.

Таблица 5 [Table 5]

Классификация способов погашения пустот [Classification of repayment options voids]

Тип [Type]	Вариант [Option]	Геомеханические условия [Geomechanical conditions]
Изоляция пустот сооружениями с предотвращением движения людей и воздушных потоков [Insulation cavities of buildings to prevent the movement of people and air flow]	Изолирующими перемычками из дерева, бетона, железо – бетона и т.п. Insulating bridges made of wood, concrete, iron – concrete, etc.	Создание плоской кровли из самозаклинившихся пород Creating a flat roof from rocks
	Породными завалами, образованными взрыванием кровли и боковых пород сокружаемыми из насыпного материала Rock rubble formed by blasting roof and sides of rocks were constructed from bulk material	
Обрушение пород The collapse of the rocks	Принудительное обрушение буровзрывными работами вместе с рудой или впоследствии на открытую камеру Forced collapse of Buro-explosive works together with the ore or subsequently, open chamber	Способность пород обрушаться без самозаклинивания
	Управляемое обрушение вместе с рудой или впоследствии на открытую камеру [Controlled collapse together with the ore or subsequently, open chamber]	
С закладкой With bookmark	Твердеющими смесями послойно или в обнаженную камеру [Hardening mixtures in layers or in naked camera]	Твердые руды и породы без ограничений Hard ores and rocks without restrictions
	Сыпучими материалами в обнаженную камеру сухими или гидравлическими Hardening of the mixture on the layers or the bare camera	
Комбинированные способы, сочетающие различные процессы Combined methods, combined processes	Перепуск пород извне вместе с рудой или на открытую камеру [Bypass rocks from outside along with the ore or the open chamber]	Выбор варианта для твердых руд и пород по преобладающему количеству признаков без ограничений The choice of option for hard ores and rocks in the prevailing number of features without restrictions
	Хвостами подземного выщелачивания без разделения или с разделением на этажи, с разделением искусственными массивами Tails leaching without separation or division into floors, with the division of artificial arrays	
	Сочетание способов изоляции и закладки твердеющими смесями: пустоты в массивах или искусственные массивы в пустотах The combination of methods of isolation and bookmarks hardening mixtures: the void in arrays or arrays in artificial cavities	
	Сочетание способов с закладкой и хвостами ПВ без разделения по восстанию, с разделением искусственными массивами The combination of modes with the tab and tails of PV without separation by rebellion, division artificial arrays	

Анализ практики погашения пустот показывает:

- погашение обрушением пород утрачивает свои позиции в связи с развитием природо-сберегающих тенденций;
- погашение изоляцией применяют в качестве вспомогательного способа в качестве субъекта комбинирования технологий;
- область применения погашения закладкой твердеющими смесями ограничивается дефицитом вяжущих и качественных заполнителей;
- степень оптимальности технологий погашения определяется полнотой знаний о закономерностях управления массивами на геомеханической основе.

Если в качестве критерия эффективности погашения принимать себестоимость погашения в расчете на 1 м³ погашенных пустот, наиболее выгодным представляется обрушение пород с разрушением земной поверхности. Обрушение связано с разрушением массива и земной поверхности, потерей и снижением качества сырья. Действительная ценность отвлекаемых у сельского хозяйства земель не адекватна стоимости, которая выплачивается в качестве компенсации. Стоимость металлов изменяется с конъюнктурой, особенно стратегических, энергетических и редкоземельных.

Поэтому в качестве критерия оптимальности погашения ранее существовавший показатель целесообразно дополнить величиной наносимого горными работами ущерба окружающей среде и затрат на реабилитацию живого вещества в зоне влияния горных предприятий.

Способы управления массивом погашением типизированы нами по принципу состояния выработанного пространства после погашения, что отличает предложенную классификацию от известных классификаций систем разработок по состоянию во время очистной выемки (табл. 5).

Перспективы освоения рудных месторождений состоят в создании единого проекта добычи запасов открытыми, подземными и специальными способами добычи, взаимосвязанными во времени и пространстве и оптимизированными по эколого-экономическим критериям. Целью такого проекта становится не только прибыль от извлечения запасов месторождения, но и применения таких технологий управления массивом, чтобы совокупный доход от освоения месторождения был максимальным.

Технико-экономическая и эколого-социальная эффективность технологий определяется успехом регулирования уровня напряжений и вовлечения в производство новых материалов для приготовления закладочных смесей [19-20].

Проблемы эффективной разработки месторождений полезных включают в себя повышение полноты освоения недр и рациональное использование подземного пространства. Прирост добычи минералов не должен увеличивать объемов извлекаемой на поверхность горнорудной массы, поэтому наиболее перспективны способы выщелачивания металлов из руд в подземных условиях.

Выводы

1. Геомеханическая сбалансированность дискретных породных сред обеспечивается за счет остаточной несущей способности природно и технологически разрушенных пород и корректируется технологией разработки.

2. Задача профилактики критических напряжений и соответствующих им деформаций решается разделением шахтного поля на геомеханически сбалансированные участки с плоской кровлей, в пределах которых могут быть применены минимизированные по затратам технологии.

3. Критерий оптимальности погашения целесообразно дополнить величиной компенсации наносимого горными работами ущерба окружающей среде.

© Разоренов Ю.И., Дзеранов Б.В. 2017

Список литературы

1. Шестаков В.А., Разоренов Ю.И., Габараев О.З. Управление качеством продукции на горных предприятиях. – Рекомендовано УМО по горному образованию Минобрнауки РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 090200 / Новочеркасск, 2001, 262 с.
2. Шестаков В.А., Белодедов А.А., Шаляпин В.Н., Твердохлебов В.Д., Разоренов Ю.И. Способ разработки крутопадающих рудных залежей малой и средней мощности системой поэтажного обрушения с гибкими разделяющими перекрытиями. – Патент на изобретение RUS 2301334 28.12.2004.
3. Голик В.И. Природоохранные технологии разработки рудных месторождений. – Москва, ИНФРА – М, 2014. Сер. Высшее образование: Бакалавриат, 192 с.
4. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology // Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. P. 77—83.
5. Воробьев А.Е., Разоренов Ю.И., Игнатов В.Н., Джимиева Р.Б. Инновационные геотехнологии разработки месторождений горючего сланца и высоковязкой нефти: Учебное пособие для магистрантов, обучающихся по горно-геологическим и нефтяным специальностям. – Новочеркасск, 2008, 214 с.
6. Разоренов Ю.И., Голик В.И., Куликов М.М. Экономика и менеджмент горной промышленности: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по горно-геологическим специальностям; Минобрнауки РФ, Южно-Российский гос. технический ун-т (Новочеркасский политехнический ин-т). Новочеркасск, 2010, 251 с.
7. Вагин В.С., Голик В.И. Проблемы использования природных ресурсов южного федерального округа: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 650100 "Приклад. геология", Владикавказ, 2005, 192 с.
8. Каплунов Д.Р., Рьльникова М.В. Развитие теории проектирования и реализация идей комплексного освоения недр// Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 4. С. 20—41.
9. Голик В.И. Специальные способы разработки месторождений. – Москва, 2014. Сер. Высшее образование: Бакалавриат, 132 с.
10. Ляшенко В.И. Научно-технические предпосылки повышения экологической безопасности в горнодобывающем регионе// ОАО «Черметинформация». Черная металлургия. 2015. № 1. С. 21—30.
11. Ветров С.В. Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд. . – М., Наука, 1975.
12. Пагиев К.Х., Голик В.И., Габараев О.З. Научные основы технологии добычи и переработки руд. – Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), 1998, 571 с.
13. Голик В.И., Полухин О.Н., Петин А.Н., Комащенко В.И. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА// Горный журнал. 2013. № 4. С. 91—94.
14. Parker H.M. Reconciliation principles for the mining industry // Mining Techn. – 2012. –Vol. 121(3). P. 160—176.
15. Ляшенко В.И., Голик В.И. Научные основы геомеханического мониторинга состояния горного массива при подземной разработке месторождений сложной структуры // Цветная металлургия. 2004. № 10. С. 2.
16. Исмаилов Т.Т., Голик В.И., Дольников Е.Б. Специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых: Уч. для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по горно-геологическим специальностям по направлению подготовки "Технологии геологической разведки". – М., 2006. Сер. Высшее горное образование, 331 с.
17. Маслобоев В.А., Селезнев С.Г., Макаров Д.В., Светлов А.В. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 4. С. 138—153.
18. Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА - надежную сырьевую основу// Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 2. – С. 101—114.
19. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste // The Social Sciences. 2015. Vol. 10. No 6. P. 750—754.

20. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7. No 5. P. 401—405.

Поступила в редакцию 2 мая 2017 г. Прошла рецензирование 11 июля 2017 г.
Принята к публикации 29 августа 2017 г.

Об авторах:

РАЗОРЕНОВ ЮРИЙ ИВАНОВИЧ, доктор технических наук, профессор, ректор, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (СКГТИ). Научные интересы: разработка месторождений полезных ископаемых, экономико-математические модели, оценка эффективности, проектирование, добыча, способы разработки, Владикавказ, 362021, Россия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, info@skgti-gti.ru

ДЗЕРАНОВ БОРИС ВИТАЛИЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры «Прикладная геология», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (СКГТИ). Научные интересы: геотектоника, оценка сейсмической опасности, детальное сейсмическое районирование, Владикавказ, 362021, Россия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, dzboris@gmail.com

Для цитирования: Разоренов Ю.И., Дзеранов Б.В. Параметры породных конструкций при подземной добыче руд // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 55—67. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-55-67.

References

1. Shestakov, V.A., Razorenov, Yu.I., Gabaraev, O.Z. (2001). *Upravlenie kachestvom produktsii na gornyyh predpriyatiyah [Management of the Quality of Products at Mining Enterprises]*. Novocherkassk. 262 p. (In Russ.)
2. Shestakov, V.A., Belodedov, A.A., Shalyapin, V.N., Tverdohlebov, V.D., Razorenov, Yu.I. (2004). *Sposob razrabotki krutopadayushchih rudnyh zalezhej maloj i srednej moshchnosti sistemoy podehtazhnogo obrusheniya s gibkimi razdelyayushchimi perekrytiyami [Method for the Development of Steeply Falling Ore Deposits of Low and Medium Power By a Sub-Floor Collapse System With Flexible Separation Overlaps]*. Patent na izobretenie RUS 2301334 28.12.2004.
3. Golik, V.I. (2014). *Prirodoohrannyye tekhnologii razrabotki rudnyh mestorozhdenij [Environmental Technologies For the Development of Ore Deposits]*. Moskva, INFRA. 192 p. (In Russ.)
4. Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye (2012). *Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology. Advances in Computer Science and Engineering*. AISC 141. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. P. 77—83.
5. Vorob'ev, A.E., Razorenov, Yu.I., Ignatov, V.N., Dzhimieva, R.B. (2008). *Innovacionnyye geotekhnologii razrabotki mestorozhdenij goryuchego slanca i vysokovyazkoj nefiti [Innovative Geotechnologies For the Development of Oil Shale and High-Viscosity Oil Fields]*. 214 p. (In Russ.)
6. Razorenov, Yu.I., Golik, V.I., Kulikov, M.M. (2010). *Ekonomika i menedzhment gornoj promyshlennosti [Economy and Management of Mining Industry]*. Yuzhno-Rossiyskiy gos. tekhnicheskij un-t (Novocherkasskiy politekhnicheskij in-t). Novocherkassk. 251 p. (In Russ.)
7. Vagin, V.S., Golik, V.I. (2005). *Problemy ispol'zovaniya prirodnyh resursov yuzhnogo federal'nogo okruga [Problems in the Use of Natural Resources of the Southern Federal District]*. Vladikavkaz. 192 p. (In Russ.)
8. Kaplunov, D.R., Ryl'nikova, M.V. (2008). *Razvitie teorii proektirovaniya i realizaciya idej kompleksnogo osvoeniya nedr [Development of the Theory of Design and Implementation of Ideas for the Integrated Development of Mineral Resources]*. *Gorniy Informtziionno-Analitcheskij Bulletin*. No 4. P. 20—41. (In Russ.)
9. Golik, V.I. (2014). *Special'nye sposoby razrabotki mestorozhdenij [Special Methods for Development of Mineral Deposits]*. Moscow, 132 p. (In Russ.)
10. Lyashenko, V.I. (2015). *Scientific and Technical Prerequisites for Improving Environmental Safety in the Mining Region. OAO «Chermetinformaciya». Chernaya metallurgiya*, No 1. P. 21—30. (In Russ.)
11. Vetrov, S.V. (1975). *Dopustimye razmery obnazhenij gornyyh porod pri podzemnoj razrabotke rud [Allowable Sizes of Outcrops of Rocks in Underground Mining of Ores]*. Moscow: Nauka. (In Russ.)
12. Pagiev, K.H., Golik, V.I., Gabaraev, O.Z. (1998). *Naukoemkie tekhnologii dobychi i pererabotki rud [High-tech technologies for production and processing of ores]*. Vladikavkaz: Severo-Kavkazskij gorno-metallurgicheskij institut (Gosudarstvennyy tekhnologicheskij universitet). 571 p. (In Russ.)
13. Golik, V.I., Poluhin, O.N., Petin, A.N., Komashchenko, V.I. (2013). *Ecological problems of development of ore deposits of KMA. Gornyy Zhurnal*. No 4. P. 91—94. (In Russ.)
14. Parker, H.M. (2012). *Reconciliation principles for the mining industry. Mining Techn.*, Vol. 121(3). P. 160—176.

15. Lyashenko, V.I., Golik, V.I. (2004). Scientific Bases of Geomechanical Monitoring of the State of the Rock Mass in Underground Deposits of Complex Structure. *Cvetnaya metallurgiya*, No 10. P. 2. (In Russ.)
16. Ismailov, T.T., Golik, V.I., Dol'nikov, E.B. (2006). *Special'nye sposoby razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [Special Methods of Field Development]*. Moscow, Ser. Vyshee gornoe obrazovanie, 331 p. (In Russ.)
17. Masloboev, V.A., Seleznev S.G., Makarov D.V., Svetlov A.V. (2014). Assessment of Environmental Hazard from Storage of Production and Processing Wastes of Copper-Nickel Ores. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. No 4. P. 138—153. (In Russ.)
18. Komashchenko, V.I., Vasil'ev, P.V., Maslennikov, S.A. (2016). The Reliable Raw Material Base to the Technology of Underground Mining of KMA Deposits. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. No 2. P. 101—114. (In Russ.)
19. Golik, V.I., Khasheva, Z.M., Shulgatyi, L.P. (2015). Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste. *The Social Sciences (Pakistan)*, Vol. 10. No 6. P. 750—754.
20. Golik, V., Komashchenko, V., Morkun, V., Khasheva, Z. (2015). The effectiveness of combining the stages of ore fields development. *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 7. No 5. P. 401—405.

PARAMETERS OF ROCK STRUCTURES FOR UNDERGROUND ORE MINING

YU.I. RAZORENOV, B.V. DZERANOV

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (STU), Vladikavkaz, Russia

The concept of preservation of the earth's surface from destruction is realized in the present work through regulating the stresses by coordinating the processes of excavating the ore in time and space according to the criterion of stress minimization. Justification of technological solutions that ensure the preservation of the massif and the earth's surface above it due to the phenomenon of residual strength of disturbed rocks is the purpose of the article. The goal is achieved through analysis of mining practices, established behavior patterns of massifs with a discrete gravity-tectonic structural stress field and methods to ensure their stability by creating conditions for locking rocks within the dome of natural equilibrium. It is shown that the geomechanical balance of discrete rock structure is provided due to the residual bearing capacity of naturally and technologically depleted rocks. A solution is proposed for the prevention of critical stresses and their corresponding deformations by dividing the mine field into areas with a flat roofing, within which cost-minimized technologies can be applied. It is recommended to supplement the criterion of repayment optimality with the amount of compensation for damage to the environment. The typification of the mines depending on stability and disturbance of massifs is given. The condition of the solidity of the massif at various stages of existence is formulated - the condition of the geomechanical balance of the geomechanical system. The workings can be typified according to the stability, depending on the size of the structural blocks of rocks in the roof. The new classification of backfilling technologies with taking into account the phenomenon of rock blocks locking is proposed. Due to the residual bearing capacity of naturally and technologically depleted rocks, under underground mining of deposits there are rock constructions whose properties are corrected by dividing the mine field into geomechanically balanced sections with flat roofing.

KEYWORDS: Geomechanics, rock, bearing capacity, stresses, deformations, flat roofing, technology of underground ore mining.

Article history: Received: May 2, 2017. Revised: July 11, 2017. Accepted: August 29, 2017.

About the authors:

RAZORENOV YURIY IVANOVITICH, doctor of technical sciences, professor, rector, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (STU). Scientific interests: development of mineral deposits, economic and mathematical models, efficiency evaluation, design, mining, development methods, Vladikavkaz, 362021, Russia, Vladikavkaz, Nikolaeva str. 44, info@skgmi-gtu.ru

DZERANOV BORIS VITALIEVITICH, candidate of geological and mineralogical sciences, associate professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (STU). Scientific interests: geotectonics, seismic hazard assessment, detailed seismic zoning, Vladikavkaz, 362021, Russia, Vladikavkaz, Nikolaeva str. 44, dzboris@gmail.com

For citation:

Razorenov Yu.I., Dzeranov B.V. (2017) Parameters of Rock Structures for Underground Ore Mining // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 55—67.
Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-55-67. (In Russ.)

Расчеты на устойчивость

УДК 539.3:534.1

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-68-73

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ СДВИГАЮЩИХ НАГРУЗОК

С.П. ИВАНОВ*, **, д-р техн. наук, профессор

О.Г. ИВАНОВ*, канд. техн. наук, доцент

А.С. ИВАНОВА*, аспирант

*Поволжский государственный технологический университет,

424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3, e-mail: sp-ivanov@mail.ru

**Марийский государственный университет

424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.1

Представлен метод расчета на устойчивость пластин под действием сдвигающих нагрузок. На основе вариационного метода Власова получена система дифференциальных уравнений для исследования устойчивости пластин. В качестве примера выполнен расчет на устойчивость шарнирно-опертой по контуру прямоугольной пластины, на которую действует сдвигающая нагрузка, приложенная в срединной плоскости. Разработан алгоритм численного расчета на устойчивость пластин методом продолжения решения по параметру сдвигающей нагрузки, составлена и реализована программа на языке Фортран. В результате получено значение критической нагрузки, которое сопоставлено с табличными данными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивость, пластина, сдвигающая нагрузка, вариационный метод Власова, критическая нагрузка.

Пластины находят широкое применение в строительстве, машиностроении и в других областях техники. На практике пластины подвергаются различным воздействиям (например, действию сдвигающих нагрузок). Поэтому задачи расчета на устойчивость пластин под действием сдвигающих нагрузок являются важными для науки и практики. Исследованиям устойчивости пластин и оболочек посвящены работы многих авторов [1-6]. Цель настоящей работы заключается в разработке метода расчета на устойчивость пластин под действием сдвигающих нагрузок, приложенных в срединной плоскости.

Рассмотрим пластину в плане (рис. 1), на которую действует сдвигающая нагрузка S , приложенная в срединной плоскости.

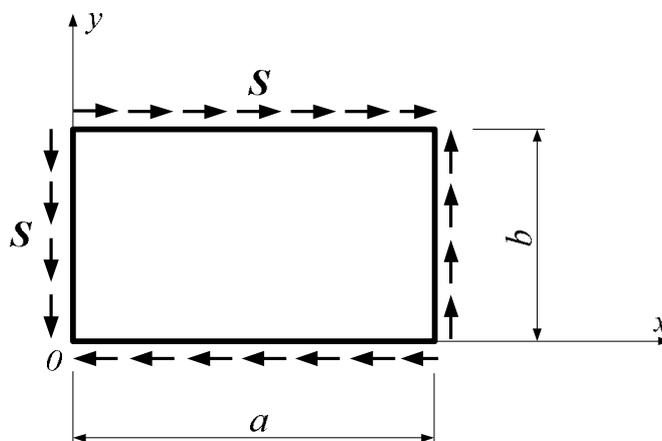


Рис. 1. Общая схема пластины в плане с действующей нагрузкой

Функцию прогибов $w(x,y)$ пластины представим в виде разложения по В.З. Власову [7]:

$$w(x,y) = \sum_i W_i(y) f_i(x); \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (1)$$

где

$W_i(y)$ – обобщенные перемещения, которые определяются из решения задачи; $f_i(x)$ – функции поперечного распределения прогибов (координатные функции), которые задаются из физического смысла задачи.

Запишем выражения для изгибающих моментов M_x , M_y и крутящего момента M_{xy} :

$$\begin{aligned} M_x &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = -D \sum_{i=1}^n [W_i(y) f_i''(x) + \nu W_i''(y) f_i(x)]; \\ M_y &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = -D \sum_{i=1}^n [W_i''(y) f_i(x) + \nu W_i(y) f_i''(x)]; \\ M_{xy} &= -D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial xy} = -D(1-\nu) \sum_{i=1}^n W_i'(y) f_i'(x); \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$D = \frac{E \cdot \delta^3}{12(1-\nu^2)} - \text{цилиндрическая жесткость пластины,}$$

δ – толщина пластины, E , ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} w_x &= \frac{\partial w}{\partial x}; & w_{xx} &= \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \\ w_y &= \frac{\partial w}{\partial y}; & w_{yy} &= \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \\ w_{xy} &= \frac{\partial^2 w}{\partial xy}; \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Составим выражение полной энергии:

$$\Pi = \iint \left\{ \frac{1}{2} (M_x w_{xx} + M_y w_{yy} + 2M_{xy} w_{xy}) - S \cdot w_x w_y \right\} dx dy, \quad (4)$$

где с учетом (1) имеем:

$$\begin{aligned} w_x &= \sum_{i=1}^n W_i(y) f_i'(x); & w_{xx} &= \sum_{i=1}^n W_i(y) f_i''(x); \\ w_y &= \sum_{i=1}^n W_i'(y) f_i(x); & w_{yy} &= \sum_{i=1}^n W_i''(y) f_i(x); \\ w_{xy} &= \sum_{i=1}^n W_i'(y) f_i'(x). \end{aligned} \quad (5)$$

Используя (1), (2) и (5), определим экстремальное значение полной энергии Π с помощью уравнений Эйлера-Лагранжа:

$$-\frac{d^2}{dy^2} \frac{\partial F}{\partial W_i''} + \frac{d}{dy} \frac{\partial F}{\partial W_i'} - \frac{\partial F}{\partial W_i} = 0, \quad (6)$$

где F – подынтегральная функция в выражении (4).

Раскрывая (6), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений для расчета на устойчивость пластин под действием сдвигающих нагрузок:

$$\sum_i \left[a_{ji} \cdot W_i^{IV} - 2b_{ji} \cdot W_i'' - \frac{S}{a^*D} d_{ji} \cdot W_i' + c_{ji} \cdot W_i \right] = 0, \quad (7)$$

где a^* – общая длина сторон пластины, на которые действует сдвигающая нагрузка S .

Коэффициенты уравнений (7) имеют вид:

$$a_{ji} = \int_x f_i f_j dx; \quad b_{ji} = \int_x f_i' f_j' dx - \frac{V}{2} [f_i f_j' + f_i' f_j]; \quad (8)$$

$$c_{ji} = \int_x f_i'' f_j'' dx; \quad d_{ji} = \int_x f_i' f_j dx; \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Полученные уравнения (7) можно применять для расчета на устойчивость пластин с различными граничными условиями на краях.

В качестве примера выполним расчет на устойчивость шарнирно-опертой по контуру прямоугольной пластины, на которую действует сдвигающая нагрузка S , приложенная в срединной плоскости (рис. 1).

Для расчета принимаем два члена ряда:

$$w(x, y) = W_1(y) f_1(x) + W_2(y) f_2(x). \quad (9)$$

Координатные функции имеют вид:

$$f_1(x) = \sin \frac{\pi x}{a}; \quad f_2(x) = \sin \frac{2\pi x}{a}. \quad (10)$$

Выбранные функции полностью удовлетворяют граничным условиям: при $x = 0$ и $x = a$ сами функции и их вторые производные равны нулю.

Система дифференциальных уравнений (7) состоит из двух уравнений:

$$\begin{aligned} & a_{11} W_1^{IV} + a_{12} W_2^{IV} - 2b_{11} W_1'' - 2b_{12} W_2'' - \frac{S}{a^*D} (d_{11} W_1' + d_{12} W_2') + \\ & + c_{11} W_1 + c_{12} W_2 = 0; \\ & a_{21} W_1^{IV} + a_{22} W_2^{IV} - 2b_{21} W_1'' - 2b_{22} W_2'' - \frac{S}{a^*D} (d_{21} W_1' + d_{22} W_2') + \\ & + c_{21} W_1 + c_{22} W_2 = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Коэффициенты уравнений (11) определяются по формулам (8), некоторые из коэффициентов принимают нулевое значение:

$$a_{12} = a_{21} = 0; \quad b_{12} = b_{21} = 0; \quad c_{12} = c_{21} = 0; \quad d_{11} = d_{22} = 0.$$

В результате получаем уравнения (11) в упрощенном виде:

$$\begin{aligned} & a_{11} W_1^{IV} - 2b_{11} W_1'' - \frac{S}{a^*D} d_{12} W_2' + c_{11} W_1 = 0; \\ & a_{22} W_2^{IV} - 2b_{22} W_2'' - \frac{S}{a^*D} d_{21} W_1' + c_{22} W_2 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Граничные условия в направлении оси y : при $y = 0$ и $y = b$ имеем:

$$\begin{aligned} W_1(0) = W_1(b) = 0; & \quad W_1''(0) = W_1''(b) = 0; \\ W_2(0) = W_2(b) = 0; & \quad W_2''(0) = W_2''(b) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Систему уравнений (12) можно решать в рядах, принимая в первом приближении:

$$W_1(y) = W_{11} \sin \frac{\pi y}{b}; \quad W_2(y) = W_{22} \sin \frac{2\pi y}{b}. \quad (14)$$

Ортогонализируем уравнения (12). Умножаем первое уравнение на выражение $\sin \frac{\pi y}{b}$, а второе – на выражение $\sin \frac{2\pi y}{b}$, затем интегрируем в пределах от 0 до b .

Для квадратной пластины ($b = a$) составляем определитель относительно неизвестных W_{11} , W_{22} и получаем значение критической силы:

$$S_{кр.} = \pm 10,14 \frac{\pi^2 D}{a^2}. \quad (15)$$

Значения по табличным данным [8]:

$$S_{кр.} = \pm 9,34 \frac{\pi^2 D}{a^2}. \quad (16)$$

Значение критической силы, полученное с помощью данного метода, превышает табличное значение примерно на 11%. Результаты проведенных расчетов в точности совпадают с результатами, полученными А.С. Вольмиром [1] на основе двойных тригонометрических рядов.

Более точное решение данной задачи можно получить при непосредственном интегрировании системы уравнений (12) численно. Для этого в первое уравнение вводится слагаемое, которое связано с малым значением поперечной нагрузки и учитывает начальное несовершенство пластины. Поскольку данная задача является краевой задачей, т.е. известные граничные условия находятся на разных краях, то для численного решения систему дифференциальных уравнений (12) сводим к системе дифференциальных уравнений первого порядка и решаем задачу Коши с начальными условиями:

$$\begin{aligned} W_1(0) = 0; \quad W_1'(0) = r_1; \quad W_1''(0) = 0; \quad W_1'''(0) = r_2; \\ W_2(0) = 0; \quad W_2'(0) = r_3; \quad W_2''(0) = 0; \quad W_2'''(0) = r_4. \end{aligned} \quad (17)$$

Неизвестные условия r_i на производных подбираются таким образом, чтобы на другом краю с определенной точностью выполнялись условия:

$$\begin{aligned} W_1(b) = 0; \quad W_1''(b) = 0; \\ W_2(b) = 0; \quad W_2''(b) = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Для подбора неизвестных r_i используется итерационный метод Ньютона. Задаваясь приращением сдвигающей нагрузки S пошагово, каждый раз интегрируем дифференциальные уравнения (12) совместно с начальными условиями (17). Решаем краевую задачу с помощью программы, составленной на языке

Фортран (для численного интегрирования применяем метод Рунге-Кутты). По результатам расчетов построена кривая зависимости перемещения w от нагрузки S (при w , стремящемся к бесконечности, находим $S_{кр.}$). Получено значение критической нагрузки, достаточно близкое к табличным данным [8].

Таким образом, дифференциальные уравнения, полученные на основе вариационного метода В.З. Власова, позволяют достаточно точно рассчитывать на устойчивость пластины под действием сдвигающих нагрузок, приложенных в срединной плоскости.

© Иванов С.П., Иванов О.Г., Иванова А.С. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. *Aydin Komur M., Sonmez M.* Elastic buckling behavior of rectangular plates with holes subjected to partial edge loading // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2015. – Vol. 112. – P. 54—60.
3. *Nazarimofrad E., Barkhordar A.* Buckling analysis of orthotropic rectangular plate resting on Pasternak elastic foundation under biaxial in-plane loading // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 23. – № 10. – P. 1144—1148.
4. *Upadhyay A.K., Shukla K.K.* Post-buckling of composite and sandwich skew plates // *Int. J. Non-Linear Mech.* – 2013. – Vol. 55. – P. 120—127.
5. *Колмогоров Г.Л., Зиброва Е.О.* Вопросы устойчивости анизотропных пластин // *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2015. – № 4. – С. 36—42.
6. *Трушин С.И., Журавлева Т.А., Сысоева Е.В.* Устойчивость нелинейно деформируемых цилиндрических оболочек из композиционного материала при действии неравномерных нагрузок // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2013. – № 2. – С. 3—10.
7. *Власов В.З.* Тонкостенные пространственные системы. – М.: Госстройиздат, 1958. – 502 с.
8. *Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д.* Пластины, диски, балки-стенки. Прочность, устойчивость и колебания. – Киев: Госстройиздат, 1959. – 1052 с.

Поступила в редакцию 2 августа 2017 г. Прошла рецензирование 1 сентября 2017 г.

Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

ИВАНОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и прикладной механики, Поволжский государственный технологический университет; профессор кафедры электромеханики, Марийский государственный университет. Опубликовал 147 научных статей, 2 монографии, 4 учебника, 20 наименований учебно-методической литературы. Научные интересы: расчеты на прочность, устойчивость и колебания физически и геометрически нелинейных стержней, пластин и пластинчатых систем. 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3, e-mail: sp-ivanov@mail.ru

ИВАНОВ ОЛЕГ ГЕННАДЬЕВИЧ, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, Поволжский государственный технологический университет. Опубликовал 35 научных статей, 1 монографию и 6 наименований учебно-методической литературы. Научные интересы: расчеты на прочность и устойчивость физически нелинейных пластин и пластинчатых систем, контактирующих с упругой средой. 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3, e-mail: IvanovOG@volgatech.net

ИВАНОВА АНАСТАСИЯ СЕРГЕЕВНА, аспирант, старший преподаватель кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, Поволжский государственный технологический университет. Научный руководитель – д.т.н., проф. Иванов С.П., Поволжский государственный технологический университет. В настоящее время работает над кандидатской диссертацией «Динамическая устойчивость физически нелинейных стержней, пластин и пластинчатых систем» по специальности 05.23.17 – «Строительная механика». Опубликовала 15 научных статей и 1 учебное пособие. Научные интересы: расчеты на устойчивость физически нелинейных стержней, пластин и пластинчатых систем. 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3, e-mail: ivanova-a-s@list.ru

Для цитирования:

Иванов С.П., Иванов О.Г., Иванова А.С. Устойчивость пластин под действием сдвигающих нагрузок // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 68—73. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-68-73.

References

1. Volmir, A.S. (1967). *Stability of deformable systems*, Moscow: Science. 984 p. (In Russ.)
2. Aydin Komur, M., Sonmez, M. (2015). Elastic buckling behavior of rectangular plates with holes subjected to partial edge loading, *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 112. P. 54—60.
3. Nazarimofrad, E., Barkhordar, A. (2016). Buckling analysis of orthotropic rectangular plate resting on Pasternak elastic foundation under biaxial in-plane loading, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. Vol. 23. No 10. P. 1144—1148.
4. Upadhyay, A.K., Shukla, K.K. (2013). Post-buckling of composite and sandwich skew plates, *Jnt. J. Non-Linear Mech.* Vol. 55. P. 120—127.
5. Kolmogorov, G.L., Zibrova, E.O. (2015). Questions of the stability of anisotropic plates, *Applied Mathematics and Control Sciences*. No 4. P. 36—42. (In Russ.)
6. Trushin, S.I., Zhuravleva, T.A., Sysoeva, E.V. (2013). The stability of nonlinear deformable cylindrical composite shells under non-uniform loads, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 2. P. 3—10. (In Russ.)
7. Vlasov, V.Z. (1958). *Tonkostennyye prostranstvennyye sistemy*, Moscow: Gosstrojizdat. 502 p. (In Russ.)
8. Vajnberg, D.V., Vajnberg, E.D. (1959). *Plastiny, diski, balki-stenki. Prochnost', ustojchivost' i kolebanija*, Kiev: Gosstrojizdat. 1052 p. (In Russ.)

THE STABILITY OF PLATES UNDER THE ACTION OF SHEARING LOADS

S.P. IVANOV, O.G. IVANOV, A.S. IVANOVA

The method of stability analysis of plates under the action of shearing loads is presented. Using variation method of Vlasov, the set of differential equations of stability of plates is given. As an example, the stability calculation of rectangular plate hinge-supported along four sides under the action of shearing load in a median surface is realized. The numerical algorithm of stability analysis of plates by the method of continuation on parameter of shearing load is developed, the Fortran program is realized. The obtained value of critical load is leveled with the table data.

KEY WORDS: stability, plate, shearing load, variation method of Vlasov, critical load.

Article history: Received: August 2, 2017. Revised: September 1, 2017. Accepted: October 18, 2017

About the authors:

IVANOV SERGEY PAVLOVICH, Doctor of Science, Professor, Head of Department of Strength of Materials and Applied Mechanics, the Volga State University of Technology; Professor of Department of Electro-mechanics, the Mari State University. He is the author of 147 scientific articles, 2 monographs, 4 textbooks, 20 names of educational literature. General research interests: Strength, stability and vibrations analyses of the physically and geometric nonlinear rods, plates and plate systems. Mailing address: Russia, 424000, the Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin Sq., b.3, e-mail: sp-ivanov@mail.ru

IVANOV OLEG GENNADEVICH, Cand. Sc, Assistant professor, Associate professor of the Department of Strength of Materials and Applied Mechanics, the Volga State University of Technology. He is the author of 35 scientific articles, 1 monograph, 6 names of educational literature. General research interests: Strength and stability analyses of the physically nonlinear plates and plate systems resting on elastic foundation. Mailing address: Russia, 424000, the Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin Sq., b.3, e-mail: IvanovOG@volgatech.net

IVANOVA ANASTASIA SERGEEVNA, aspirant, senior lecturer of the Department of Strength of Materials and Applied Mechanics, the Volga State University of Technology. Scientific adviser - Doctor of Science, Professor Ivanov S. P., the Volga State University of Technology. At the present time she works on the Candidate's dissertation «The dynamic stability of physically nonlinear rods, plates and plate systems» in the specialty 05.23.17 – « Structural Mechanics». She is the author of 15 scientific articles, 1 name of educational literature. General research interests: Stability analyses of the physically nonlinear rods, plates and plate systems. E-mail: ivanova-a-s@list.ru

For citation:

Ivanov S.P., Ivanov O.G., Ivanova A.S. (2017) The stability of plates under the action of shearing loads. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017. No 6. 68—73. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-68-73. (In Russ.)

Экспериментальные исследования

УДК 691.32:691.16

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-74-80

BORASSUS AETHIOPUM MART OF BENIN USED AS REINFORCEMENT IN CONCRETE: ADHESION CHARACTERISATION

SOHOUNHLOUE A. Y. Jamik¹,

GBAGUIDI AISSE Gérard Léopold¹,

SOLBES Bernard², GALIMARD Philippe²,

¹Laboratoire d’Énergétique et de Mécanique Appliquées (LEMA) – EPAC – Bénin

²I2M-GCE Université de Bordeaux; s.agbecin@yahoo.fr

Researches carried out in Benin allowed the use of Borassus aethiopum mart as reinforcement in concrete. The aim of this study is to examine the bond of the two materials. The results of pull out tests have shown that the bonding strength is around 1 MPa. This adhesion rate decreases slightly when the bond length increases; on the other hand, the adhesion rate increases slightly when the concrete strength increases. The behaviour of Borassus / concrete interface shows a first phase of perfect adhesion followed by a second phase of progressive loss of adhesion and a final friction phase which continues until the complete output of the reinforcement from the concrete.

Key words: Borassus aethiopum mart, reinforcement, concrete, pull-out test, bond

1. Introduction

Borassus aethiopum mart is a palm tree which belongs to the *Arecaceae* family. Researches carried out in Bénin showed that this palm tree had been long used during the colonial period. The average land area is 2.1 m² / ha with a minimum of 5.8m² / ha in Savè and 1.9m² / ha with a minimum of 0.1m² / ha and a maximum of 4m² / ha in Ouidah [1]. These low percentages can be explained by the pressure from the local populations on the stands, in particular the felling of the tree for the wine production and for the construction. According to many authors *Borassus aethiopum mart* constitutes in Africa one of the best “timber wood” in the Sahelo-Sudanian zone; Since the arrival of the Europeans, *Borassus aethiopum mart* stands, near the agglomerations have been overexploited for local uses [2-3-4].

Other studies carried out showed that 47.5% of buildings in which *Borassus aethiopum mart* is used are more than 50 years old; 24.9% are between 25 and 50 years old, and 27.6% are over 25 years old in the study area; Buildings more than 50 years old show that the use of *Borassus aethiopum mart* in construction is long dated; the studies carried out on these buildings showed that *Borassus aethiopum mart* structure elements were practically in their original form [5].

In order to optimize *Borassus aethiopum mart* structure elements sections, such as beams, columns etc., [1] interested in physical and mechanical characterization of the ligno-cellulosic material between the pith and bark of this palm tree. So, for 12% of moisture content, the density of ligno-cellulosic material is 890 kg/m³. This implies that this material belongs to “heavy wood” group [5-6]. But this density is lower than steel density which is 7800 kg/m³, and higher than *Afzélia africana* one or *Doussié* which is 800 Kg / m³ [7]. The tensile strength is 300 MPa at 12% moisture content. This value is close to steels FeE 215 generally used in reinforced concrete. The compressive strength is 75 MPa at 12% moisture content. This value is higher than *Afzélia africana* one which is 72MPa. The Young modulus in four-point bending at 12% moisture content is 17196 MPa and the failure strength is 186 MPa. These mechanical characteristics of *Borassus aethiopum mart* in the axial direction differ from those reported by [8] which are respectively 105 MPa and 92.5 MPa in tension and compression parallel to the fibers; in compression perpendicular to fibers, the failure strength is 26 MPa.

From all above, this material can be used as reinforcement in the concrete. The four-points bending tests realized by [5] on *Borassus aethiopum mart* reinforced con-

crete beams showed that the composite material behaves like usual materials. Stress–strain curves presented a first phase of elastic deformation, followed by a second phase of plastic deformation.

However, to our knowledge, there is no research concern the adhesion rate between the two materials. This justifies the present study, which is interested in the determination of the adhesion rate between *Borassus aethiopum mart* and concrete, and the interface behavior of the two materials.

2. Materials and methods

▪ ***Borassus aethiopum mart***

Borassus aethiopum mart plant (Picture 1) used for this study came from Pahou-Ahazon forest located about 6 km at east of Ouidah and 40 km at west of Cotonou (Bénin) (Figure 1). After felling, these plants were cut, split into slats and conditioned at 12% of moisture content. Then they have been sawn in 20×20 mm² section. The kind of *Borassus* felled is the male.

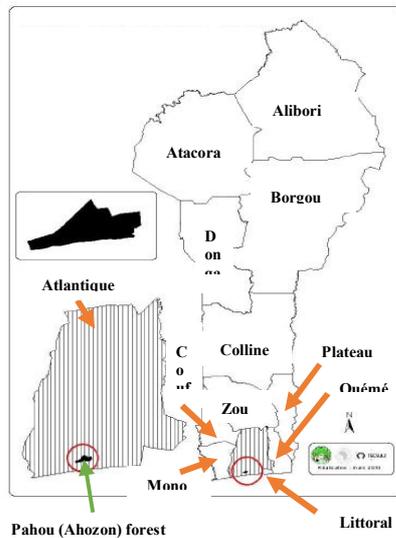
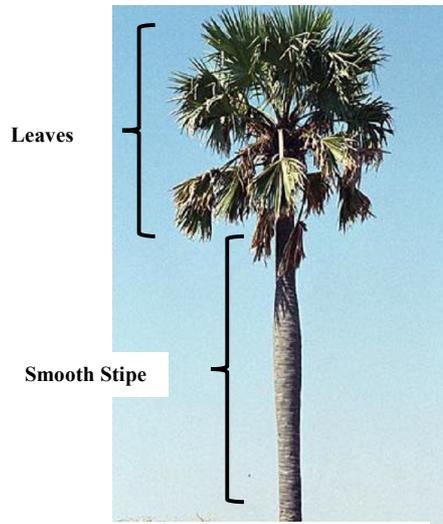


Figure 1. Pahou (Ahozon) forest



Picture 1. Borassus male

Table 1. Specimen’s nomenclature

Désignation	Concrete size (mm ³)	Bond length (mm)	Compressive strength of concrete (MPa)	Samples Number
T50-20	100×100×100	50	20	3
T50-30	100×100×100	50	30	3
T80-20	100×100×100	80	20	3
T80-30	100×100×100	80	30	3
T80-20	200×200×200	80	20	3
T80-30	200×200×200	80	30	3
T150-20	200×200×200	150	20	3
T150-30	200×200×200	150	30	3

▪ **Concrete**

For this study, we have realized two formulations of concrete by Dreux Gorisse method. Thus, we obtained two compressive strength of concrete such as 20 and 30 MPa. In the first case, the gravel / sand and water/cement ratio is respectively 1.84 and 0.61; in the second case, it’s respectively 1.84 and 0.51.

▪ **Nature of test specimens**

Test specimens elements are *Borassus aethiopum mart* with 20×20 mm² cross section embedded respectively in a concrete prism of 200×200×200 mm³ and 100×100×100 mm³ size. Table 1 summarizes the nomenclature of the specimens. To

avoid the effects of non-uniform shear stress distribution in conventional tests, only the middle part of the bar is subjected to shear [9]. Specimen's configuration is shown in figure 2. In all, 24 test specimens have been realized as shown in picture 2&3.

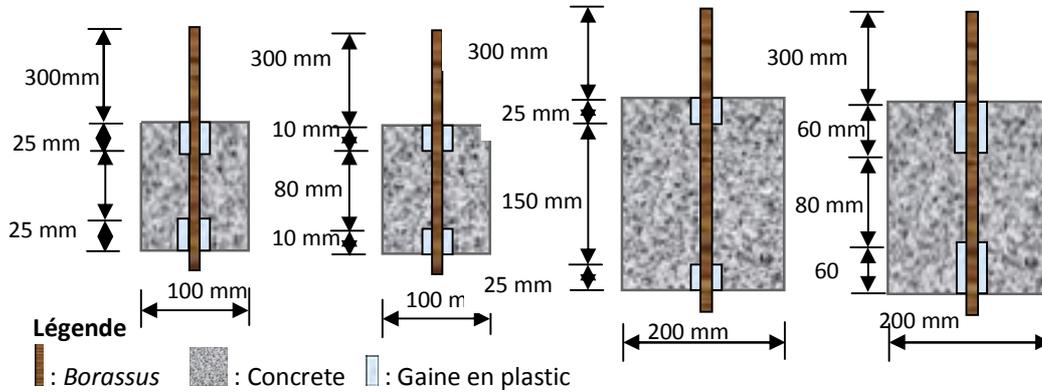


Figure 2. Specimen's configuration



Picture 2. Pull-out specimen with 20 MPa of strength of concrete



Picture 3. Pull-out specimen with 30 MPa of strength of concrete

▪ **Test procedure**

The bonding between *Borassus aethiopum mart* and concrete has been established in pull-out tests shown in figure 3. A good bond between the reinforcement and the concrete is necessary to ensure an effective transfer of tensile stresses from the concrete to the reinforcement [10].

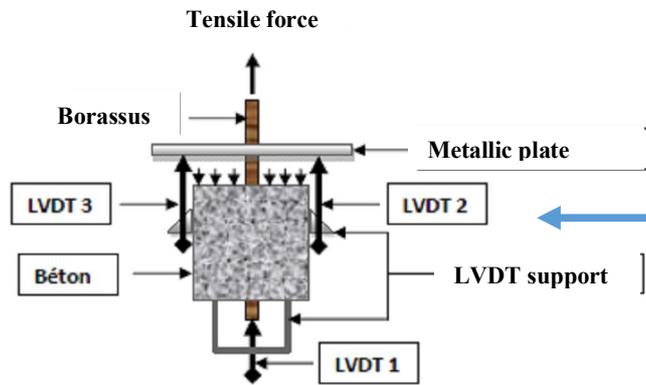


Figure 3. Device detail

Picture: Experimental device



The experimental device consisted of a MTS press with a maximal capacity of 50 KN and a frame fixed to the test press. The upper jaws of the press hold the speci-

men through a hole of 30 mm of diameter on the upper plate of the frame. A clamp intimately maintains the contact between the test piece and the plate. Two linear variable displacement transducers (LVDT's) were placed on opposite sides of the test specimen to measure the average slip of *Borassus* relative to concrete. Another LVDT is placed on the bottom of the test specimen to measure *Borassus* displacement as illustrated in picture 5. During the test all datas are recorded in a computer.

3. Results and discussions

Pull-out tests results provided allow us to trace load-deflection curves reflecting the behavior of two materials as shown in figure 4 & 5. Those Figures respectively show the adhesion variation relative to the average displacements of LVDT 2 and 3 for specimen T50-20; T50-30; T80-20; T80-30. In order to differentiate the three samples of the same type of specimen, the designations of the specimens shall be followed by the letters a, b, or c. To better observe the behavior of the interface of the two materials, it is interesting to observe every LVDT displacement. Figure 6 shows the adhesion-displacement curves of the test specimen Tc80-30. In this figure 6, we can observe the displacement at the bottom and at the exit of the embedment. The displacement at the bottom is given by LVDT1 and the displacement at the entrance of the embedment is given by the average of LVDT2 and 3.

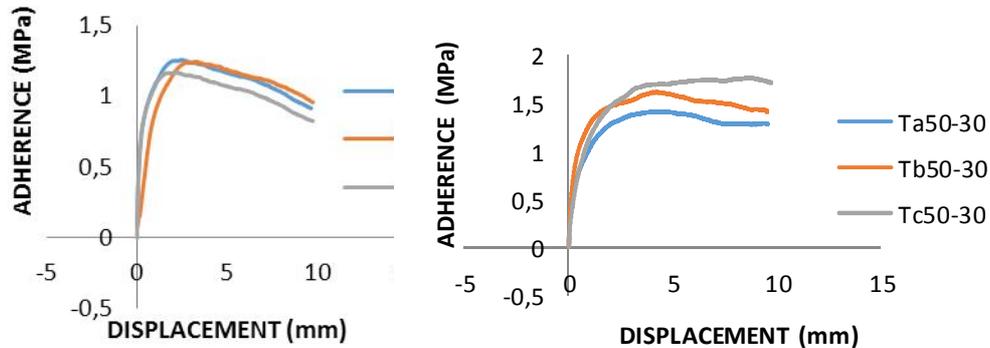


Figure 4. Adhérence - Displacement curves of test specimen T50-20 and T50-30

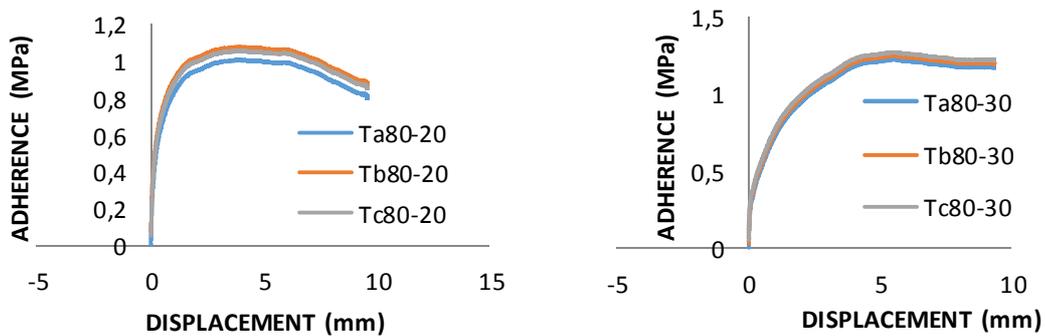


Figure 5. Adhérence - Displacement curves of test specimen T80-20 et T80-30

Close observation of the curves shows a first quasi-linear zone followed by an inflection which continues until the peak of the effort. After the peak, the effort stabilizes at a non-zero residual value. But before the inflection, a first fall occurs, marking the exhaustion of the adhesion. The shape of these curves is close to that reported by some authors after pull-out tests on reinforced concrete specimens [10-11]. For example, in figure 6, we can observe a first phase of perfect adhesion between *Borassus* - concrete; Followed by a second phase of progressive loss of adhesion between the two materials; which results in a gradual increase in strength and a large displacement

up to the peak of effort. The last phase is that of friction; it continues until the exit of the reinforcement of the concrete. Picture 6 shows a test piece after testing.

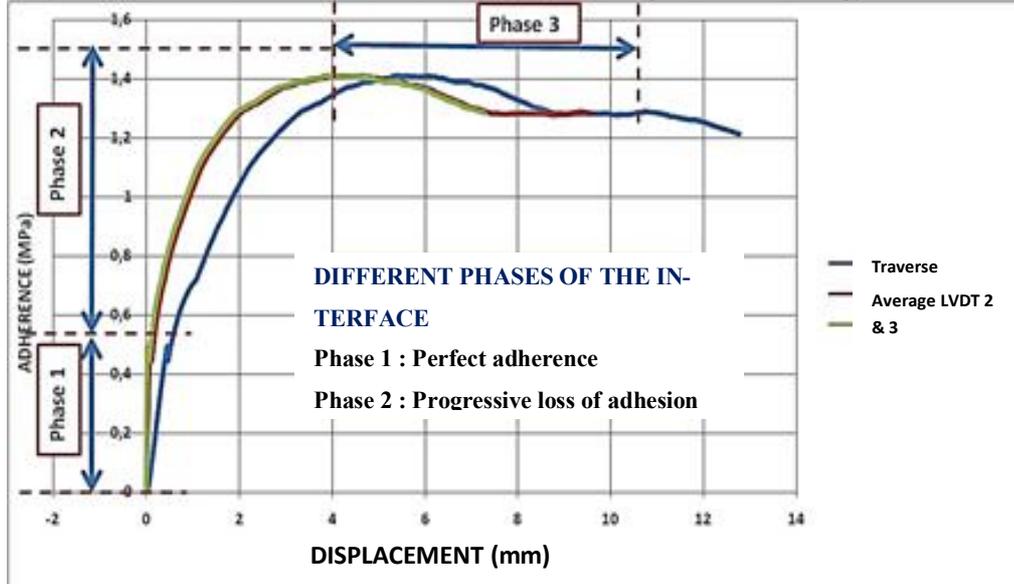
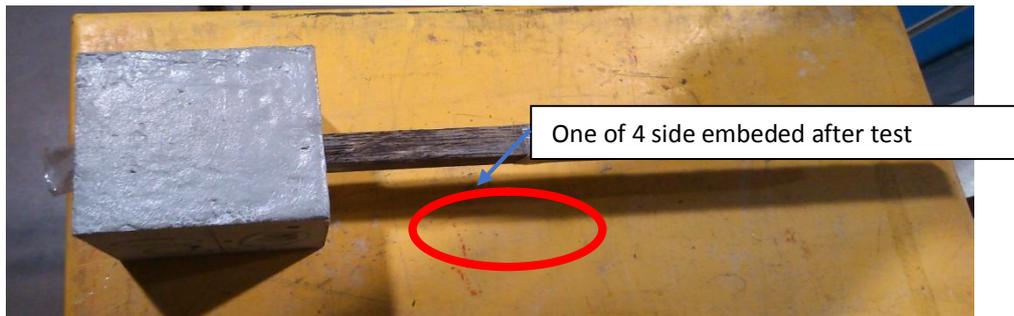


Figure 6. Adherence-displacement curves for specimen Tc80-30



Picture 5. Specimen after testing

In this picture, we note that the embedment surface remained intact after testing. Some mortar marke visible on this surface testify to the lightness of the bond between the two materials. This phenomenon is noticed with smooth steel and the chemical adhesion constitutes at this stage the unique phenomenon allowing to transfer the forces to bond [12]. Its rupture corresponds to the rupture of the interface. Moreover, curves analysis and interpretation allowed us to determine the rate of adhesion between the two materials. This rate is given by the following formula:

$$\tau = \frac{F_{max}}{S_{ancree}}$$

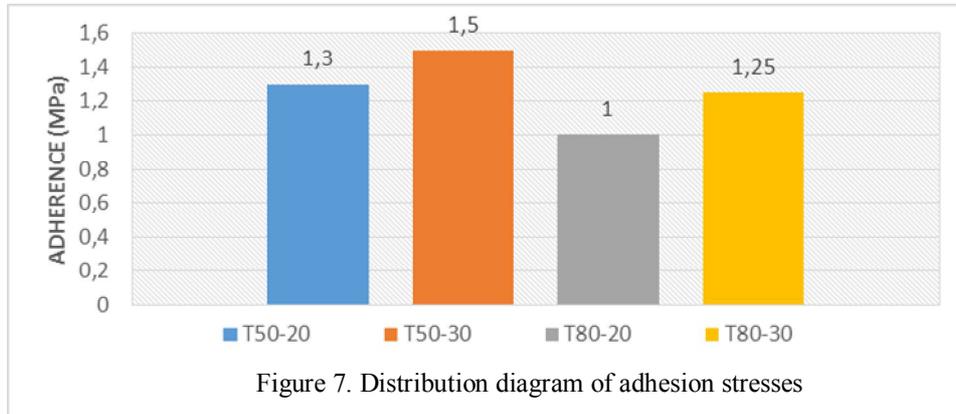
τ : Adhesion stress
 F_{max} : Maximal load
 S_{ancree} : Surface embeded in the concrete.

In this diagram, we note that for the same embedment length of the reinforcement, the adhesion rate increases slightly with the strength of the concrete. On the other hand, for the same strength of the concrete, the adhesion rate decreases slightly with the embedment length. This same phenomenon was observed after pull-out tests on smooth steel reinforced concrete specimens [12].

Table 2 summarizes the values of the adhesion rate calculated. This table allows us to plot the distribution diagram of adhesion stresses (Figure 7).

Tableau 2. Valeur moyenne du taux d'adhérence

Désignation	Adherence (MPa)	Coefficient of Variation(%)
T50-20	1,3	5
T50-30	1,5	10
T80-20	1	7
T80-30	1,25	2



Moreover, these adhesion values are higher than the bamboo-concrete or rattan-concrete adhesion rate which is around 0.5 MPa [11-13-14].

In the case of the test specimens of 200 mm side, during the tests, we observed ruptures appears at the head of the specimen. This reveals the influence of the confinement on the adhesion between the two materials.

4. Conclusion

In conclusion, this research allowed us to evaluate the adhesion rate between *Borassus* and concrete and to study the behavior of the interface of the two materials. It appears that *Borassus*-concrete adhesion is around 1 MPa; it is equal to smooth steel-concrete adherence, but greater than bamboo-concrete, or rattan-concrete one which is around 0.5 MPa [9-12-13]. The behavior of the interface presents a first phase of perfect adhesion between *Borassus* and concrete; Followed by a second phase of progressive loss of adhesion between the two materials and a last friction phase which continues until the concrete reinforcement is released.

© Sohounhloue A. Y. Jamik, Gbaguidi Aisse Gerard Leopold, Solbes Bernard, Galimard Philippe. 2017
References

[1] Gbaguidi A. Gérard et al (2010) Détermination expérimentale des principales caractéristiques physiques et mécaniques du bois du rônier (*Borassus aethiopum mart*) d'origine béninoise, *African Journal on Line (AJOL)*, série E, Vol. 12, No. 2. P. 1—9.

[2] Giffard P. L. (1967) *Le palmier rônier, Borassus aethiopum mart* «Bois et forêt des tropiques », N° 116, édition CTFT, Paris (France). 12 p.

[3] Cabannes Y. et Chantry G., *Le rônier et le palmier à sucre: Production et mise en œuvre dans l'habitat*. Edition GREF. 1987. France. 90p.

[4] Portères R. (1964) Le palmier rônier (*Borassus Aethiopum Mart*) dans la province de Baoulé (Côte d'Ivoire), *Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée*. Vol. 11, No. 12. P. 499—514.

[5] Gbaguidi A. Gérard et al (2011) Etude de la possibilité d'utilisation du rônier comme armature dans les éléments en Béton: cas des poutres, *Annales des sciences agronomiques*. Vol. 15, No. 1. P. 67—68.

[6] Ngarguededjim et al (2015) Caractéristiques physiques du bois Rônier (*Borassus Aethiopum Mart.*, Arecaceae) du Tchad / Afrique Centrale, *International Journal of Innovation and Applied Studies*. Vol. 13, No. 3. P. 553—560.

[7] Benoit Y. (2008) *Le guide des essences de bois*, deuxième édition Eyrolles. Paris, France. 145 p.

[8] Samah O. D., Amey K. B., & Neglo K. (2015) Determination of mechanical characteristics and reaction to fire of "RONIER" (*Borassus aethiopicum mart.*) of Togo. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 9(2). P. 80—85.

[9] Ghavami K. (2005) Bamboo as reinforcement in structural concrete elements, *Cement & Concrete Composites*. Vol. 27. P. 637—649.

[10] Eligehausen R., Popov E., et Bertero V. (1983) Local Bond Stress-slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations: Experimental Results and Analytical Model. Report (University of California, Berkeley. Earthquake Engineering Research Center). Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.

[11] Walid D. (1952) *Contribution à l'étude de l'adhérence des fers d'armature au béton*, Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich. P. 60—70.

[12] Lutz L., Gergely P., 1967. Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete. *ACI Journal*. 64(11). P. 711—721.

[13] Nindyawati et al, (2013) The comparison between pull out test and beam bending test to the bond strength of bamboo reinforcement in light weight concrete, *International Journal of Research of Engineering Research and Applications*. 3. P. 1497—1500.

[14] Foudjet et Fomo (1995) Une nouvelle méthode d'accroissement de l'adhérence entre une armature en matière végétale et le béton (effet de confinement) : cas de l'armature de rotin dans le béton de nodules latéritiques, *J. of Materials and Structures*. 28(11). P. 554—557.

Article history: Received: June 2, 2017. Revised: September 4, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors:

SOHOUNHLOUE Agbécin Yao Jamik, Civil Engineer, Phd student in Materials and Structures. Scientific interests: Vegetal fibers, Materials Engineering, reinforced concrete structures. University of Abomey-Calavi (Republic of Benin); Laboratory of Materials and Structures (LAMS); 02 BP 244 Cotonou, Republic of Benin, s.agbecin@yahoo.fr

GBAGUIDI AÏSSE Gérard Léopold, Senior Lecturer, Department of Civil Engineering, University of Abomey-Calavi (UAC). Expert at the Benin Courts. Director of the Graduate School of Civil Engineering VERECHAGUINE A.K. Director of Laboratory of Materials and Structures (LAMS), Republic of Benin. Scientific interests: Vegetal fibers, Materials Engineering, reinforced concrete structures. 02 BP 244 Cotonou, gbaguidi.gerard@yahoo.fr

GALIMARD Philippe, Senior Lecturer, Department of Civil Engineering, Laboratory « Institut de Mécanique et d'Ingénierie – Bordeaux » University of Bordeaux I2M, CNRS UMR 5295, Republic of France. Scientific interests: Wood structures, Materials Engineering. philippe.galimard@u-bordeaux.fr

SOLBES Bernard, Civil Engineer, Laboratory technician, University of Bordeaux, Laboratory « Institut de Mécanique et d'Ingénierie – Bordeaux » I2M, CNRS UMR 5295. Republic of France. Scientific interests : Wood structures, Materials Engineering, bernard.solbes.@u-bordeaux.fr

For citation:

Sohounhloue A.Y. Jamik, Gbaguidi Aïsse Gerard Leopold, Solbes Bernard, Galimard Philippe. (2017) Borassus aethiopicum mart of Benin used as reinforcement in concrete: Adhesion characterisation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No. 6. 74—80. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-74-80.

ВОЛОКНА ПАЛЬМЫ, РАСТУЩЕЙ В БЕНИНЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ КАК АРМАТУРА В БЕТОНЕ: ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦЕПЛЕНИЯ

SOHOUNHLOUE A.Y. JAMIK, GBAGUIDI A.G. LEOPOLD, SOLBES B., GALIMARD Ph.

Исследования, выполняемые в Бенине, подтверждают возможность использования волокон пальмы (*Borassus aethiopicum mart t*) в качестве арматуры бетона. Изучение сцепления этих двух материалов есть цель представленного исследования. Результаты, выполненных экспериментов, показали, что сила сцепления составляет порядка 1 МПа. Показатели сцепления слегка понижаются, когда длина сцепления увеличивается, с другой стороны, показатели сцепления слегка увеличиваются, когда прочность бетона увеличивается. Поведение материала из волокон пальмы и бетона показывает, что в начале испытания появляется значительное сцепление, во второй фазе испытания следует прогрессирующее снижение сил сцепления и, наконец, финальная стадия испытания включает в себя выдергивание волокнистой арматуры из бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Borassus aethiopicum mart*, армирование, бетон, тест на выдергивание арматуры из бетона, сцепление.

Для цитирования: Sohounhloue A.Y. Jamik, Gbaguidi Aïsse Gerard Leopold, Solbes Bernard, Galimard Philippe. Borassus aethiopicum mart of Benin used as reinforcement in concrete: Adhesion characterization// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 74—80. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-74-80.

Требования к оформлению статей в журнал «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений»

Текст статьи подготавливается в виде компьютерной, готовой к изготовлению печатной матрицы, распечатки и варианта на электронном носителе. Текст распечатки должен быть четким. Формат текста с размером по вертикали 23 см и по горизонтали 13,5 см. Текст размещается в середине листа формата А4.

Поля рукописи должны быть следующие:
верхние и нижнее по 3,4 см; справа и слева по 3,8 см.

Отступ первой строки абзаца – 0,75 см.

Текст подготавливается в системе *Word*, размер шрифта 11 пунктов. Шрифт *Times New Roman*, межстрочный интервал *одинарный*. Текст оформляется по аналогии с представленными в сборнике статьями. Обязательно использовать *автоматический перенос*.

Перед заголовком указывать *УДК*.

Заголовок **СТРОЧНЫМИ** буквами, жирным шрифтом, центрируется (в заголовке не должно быть переносов).

После пропуска одной строки следует И.О. ФАМИЛИЯ, *ученая степень, ученое звание* (или *инженер, аспирант, студент*) (курсивом) автора. Соавтор аналогично.

С новой строки: *Организация* (место работы, курсивом). Если соавторы из разных организаций против каждого автора из одной организации ставится одна звездочка *, против авторов (соавторов) из другой организации – две звездочки ** (и т.д.). После последовательного перечисления всех авторов статьи (каждого с новой строки) следуют наименования организаций, предваренные * или ** (и т.д.) звездочками. Затем с новой строки следует полный почтовый и электронный адрес автора.

После пропуска одной строки следует *краткая аннотация статьи* (курсив, 10 пт) объемом 6-8 строк, затем после пропуска одной строки идут ключевые слова, и, наконец, после пропуска одной строки идет основной текст.

После основного текста следует: *Список литературы* (центрируется)

Далее идет пронумерованный список цитируемой литературы (Full – 10). Авторы выделяют курсивом.

Далее оставляется пустыми 3 строки для редакционных вставок.

После этого с новой строки идет информация «Об авторе» (см. статьи в журнале).

Затем с новой строки следует:

References (центрируется) и повторяется цитируемая литература на английском языке или на родном языке, но латинскими буквами (Full – 9) с переводом на английский язык в квадратных скобках.

В заключительной части статьи приводятся **НАЗВАНИЕ** статьи (строчными жирными буквами), Ф.И.О. авторов (централизуются) и перевод аннотации статьи на иностранный, предпочтительнее, английский язык. Затем с новой строки идут ключевые слова (KEY WORDS: ...) на английском языке. Далее идет перевод на английский язык информации уже написанной на русском языке (см. статьи в журнале).

Рисунки оформляются в тексте статьи предпочтительно средствами *Word* или других графических средств. Рисунки, выполненные чертежными средствами (тушью или черными чернилами), должны быть аккуратными с четкими надписями. Рисунки и надписи на них должны быть единым целым (сгруппированы) и не распадаться при их перемещении. Рисунки отделяются от текста на 6 пт.

Формулы в тексте статьи готовятся с помощью редактора формул *Microsoft equation* с установленными параметрами:

Full – 11, Subscript/Suhtscript – 9, Sub-Subscript/Suhtscript – 7,

Symbol – 14, Subsymbol – 10.

Математика (функции) – латинские символы курсивом, греческие символы – прямым шрифтом. Между формулами и сверху, снизу от текста интервал 3 пт.

Номера страниц проставляются карандашом в левом нижнем углу страницы. Последняя страница предоставляется в двух экземплярах, второй экземпляр подписывается авторами статьи.

Редакция имеет право снимать с публикации статьи, не отвечающие указанным требованиям, или, если на статью поступят два отрицательных отзыва рецензентов, или членов редакционного совета, или членов редколлегии журнала.