

# СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

2019 Том 15 № 5

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5

<http://journals.rudn.ru/structural-mechanics> (открытый доступ)

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал  
Издается с 2005 г.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-19706 от 13 апреля 2005 г.

выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране наследия  
Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

ISSN 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online)

Периодичность: 6 выпусков в год.

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, Cyberleninka, DOAJ, EBSCOhost, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Dimensions.

Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России по группе научных специальностей 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения, 05.23.17 – Строительная механика.

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 20479 (полгода).

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 машино-строительных конструкций, освещает вопросы научно-технического прогресса в строительстве и машиностроении, публикует аналитические обзоры по теме журнала.

Сайт журнала содержит полную информацию о журнале, его редакционной политике и этических принципах, требования к подготовке и условия публикации статей, а также полные выпуски журнала с 2008 г. (в рамках политики свободного доступа).

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*Акимов П.А.*, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва, Россия

### ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

*Галишикова В.В.*, д-р техн. наук, доц., РУДН, Москва, Россия

### ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР

*Мамиева И.А.*, РУДН, Москва, Россия

### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

*Азапов В.П.*, д-р техн. наук, проф., МГСУ, Москва, Россия

*Андреев В.И.*, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва, Россия

*Баженов В.А.*, акад., Национальная академия педагогических наук, д-р техн. наук, проф., КНУСА, Киев, Украина

*Буй Суан Нам*, доцент, Ханойский университет горного дела и геологии, Ханой, Вьетнам

*Ванин В.В.*, д-р техн. наук, проф., Киевский политехнический университет, Киев, Украина

*Галик В.И.*, д. член РАЕН, д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

*Заксенхофер Райханд Ф.*, профессор, Горный университет в Леобене, Австрия

*Зверев Е.М.*, д-р техн. наук, проф., ИПМ РАН, Москва, Россия

*Иванов С.П.*, д-р техн. наук, проф., ПГТУ (ВолгаТех), Йошкар-Ола, Россия

*Карпенко Н.И.*, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ РААСН, Москва, Россия

*Колчунов В.И.*, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ЮЗГУ, Курск, Россия

*Красич Соня*, кандидат технических наук, Нишский университет, Ниш, Сербия

*Лисичкин С.Е.*, д-р техн. наук, ООО «ИЦСКТЭ», Москва, Россия

*Ляхович Л.С.*, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск, Россия

*Магуле Фредерик*, профессор, Высшая инженерная школа «Централь Сьюпелек», Университет Париж-Сакли, Франция

*Мандроне Джузеппе*, доцент, Университет Турина, Италия

*Обозов В.И.*, д-р техн. наук, проф., ЦНИИСК, Москва, Россия

*Санжаровский Р.С.*, д-р техн. наук, проф., ЕНУ им. Гумилева, Астана, Казахстан

*Травуш В.И.*, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ЭНПИ, Москва, Россия

*Якутов Н.М.*, чл.-корр. РИА, д-р техн. наук, проф., ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пащенко Ф.А.* Разработка методики расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен уголкового типа ..... 339

*Саламахин П.М., Часовников А.Д.* Концепция разработки программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности ..... 345

### ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ

*Морозов Ю.А.* Исследование предельных деформаций листовой вытяжки с учетом пластического утонения и разрушения материала ..... 353

*Galishnikova V.V., Chiadighikaobi P.C., Emiri D.A.* Comprehensive view on the ductility of basalt fiber reinforced concrete focus on light-weight expanded clay (Исследование влияния дисперсного армирования базальтовой фиброй на пластические свойства легких бетонов на керамзитовом гравии) ..... 360

### ТЕОРИЯ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК

*Тушикова Е.М.* Выбор оптимальной оболочки покрытия на квадратном плане в виде поверхности переноса ..... 367

### ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ

*Иванов В.Н., Алёшина О.О.* Сравнительный анализ результатов определения параметров напряженно-деформированного состояния оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом в основании ..... 374

### ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*Кузьмин Д.А., Андреев В.И.* Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов ..... 384

*Маджидов И.У., Арипходжаева М.Б., Рахматова Д.М., Сулейманов А.А.* Расчет сейсмозащитных качеств демпфера и гасителя с возможностью их использования в летательных аппаратах ..... 392

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Зылев В.Б., Платнов П.О.* Использование точек покоя при экспериментальном изучении внутреннего трения в материале ..... 399

Редактор Ю.А. Заикина

Дизайн обложки: Ю.Н. Ефремова

Компьютерная верстка: Ю.А. Заикина

Адрес редакции:

Российский университет дружбы народов

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; тел.: +7 (495) 955-08-28; факс: +7 (495) 955-08-28; e-mail: [stmj@rudn.ru](mailto:stmj@rudn.ru); [i\\_mamieva@mail.ru](mailto:i_mamieva@mail.ru)

Подписано в печать 23.10.2019. Выход в свет 30.10.2019. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 7,90. Тираж 250 экз. Заказ № 1867. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН)

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

© Российский университет дружбы народов, 2019  
© Кахамарка-Сунига Д., фото на обложке  
(Ingalls Rink, Нью-Хейвен, Коннектикут, США), 2019

# STRUCTURAL MECHANICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS AND BUILDINGS

2019 VOLUME 15 No. 5

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5

<http://journals.rudn.ru/structural-mechanics> (Open Access)

Founded in 2005

by Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

ISSN 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online)

Published 6 times a year.

Languages: Russian, English.

Indexed by RSCI (elibrary.ru), Cyberleninka, DOAJ, EBSCOhost, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Dimensions.

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.

Review-and-analytic and scientific-and-technical peer-reviewed journal "Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings" 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 website contains full information about the Journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, etc., as well as full-text issues of the Journal since 2008 (Open Access).

## EDITORIAL BOARD

### EDITOR-IN-CHIEF

*P.A. Akinov*, Chairman, Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, DSc, Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

### ASSISTANT EDITOR-IN-CHIEF

*V.V. Galishnikova*, DSc, RUDN University, Moscow, Russia

### MANAGING EDITOR

*I.A. Mamieva*, RUDN University, Moscow, Russia

### MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

*V.P. Agapov*, DSc, Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

*V.I. Andreev*, Chairman, Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, DSc, Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

*V.A. Bazhenov*, Member of the National Academy of Educational Science of Ukraine, DSc, Professor, Kiev National University of Building and Architecture, Kiev, Ukraine

*Xuan Nam Bui*, PhD, Assoc. Professor, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

*V.I. Golik*, Member of the Russian Academy of Sciences, DSc, Professor, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

*S.P. Ivanov*, DSc, Professor, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

*N.I. Karpenko*, Member of the RAACS, DSc, Professor, NIISF RAACS, Moscow, Russia

*V.I. Kolchunov*, Member of the RAACS, DSc, Professor, South-West State University, Kursk, Russia

*Sonja Krasic*, PhD of Technical Science, University of Nis, Nis, Serbia

*S.E. Lisichkin*, DSc, Scientific Research Institute of Energy Structures, Moscow, Russia

*L.S. Lyakhovich*, Member of the RAACS, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB), Tomsk, Russia

*Fredéric Magoulès*, DSc, Professor, Centrale Supélec, Université Paris-Saclay, France

*Giuseppe Mandrone*, PhD, Ass. Prof. in Engineering Geology, University of Torino, Italy

*V.I. Obozov*, DSc, Professor, Central Research Institute of Building Structures (TzNIISK im. V.V. Kucherenko), Moscow, Russia

*Reinhard F. Sachsenhofer*, PhD, Professor, Montanuniversität Leoben, Austria

*R.S. Sanjarovskiy*, DSc, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

*V.I. Travush*, Member of the RAACS, DSc, Professor, ENPI, Moscow, Russia

*V.V. Vanin*, DSc, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine

*N.M. Yakupov*, Corresponding Member of Russian Engineering Academy, DSc, Professor, IME of FIC KazanSC of RAS, Russia

*E.M. Zveryaev*, DSc, Professor, Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences), Moscow, Russia

## CONTENTS

### ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

- Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashenko F.A.* Development of a method for calculating the stress state in horizontal sections of hydraulic engineering angular-type retaining walls ..... 339
- Salamakhin P.M., Chasovnikov A.D.* The concept of development of computer aided design programs for bridges or other engineering structures according to the specified criterion of optimality ..... 345

### THEORY OF PLASTICITY

- Morozov Yu.A.* The study of marginal deformations of the leaf extracts with regard to plastic thinning and destruction of the material ..... 353
- Galishnikova V.V., Chiadighikaobi P.C., Emiri D.A.* Comprehensive view on the ductility of basalt fiber reinforced concrete focus on lightweight expanded clay ..... 360

### THEORY OF THIN ELASTIC SHELLS

- Tupikova E.M.* Optimization study of shape of translational shell of square plan ..... 367

### NUMERICAL METHODS OF ANALYSIS OF STRUCTURES

- Ivanov V.N., Alyoshina O.O.* Comparative analysis of the results of determining the parameters of the stress-strain state of equal slope shell ..... 374

### DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGS

- Kuzmin D.A., Andreenkova A.V.* The research of the stress-strain state with local thinning in pipelines and determination of allowable values of concentration stress and strain ..... 384
- Madzhidov I.U., Aripkhodzhaeva M.B., Rakhmatova D.M., Suleymanov A.A.* Calculation of seismic qualities of the damper and vibration transducer with the possibility of their use in aircraft ..... 392

### EXPERIMENTAL RESEARCHES

- Zylev V.B., Platnov P.O.* The use of fixed points in experimental research of the internal friction of material ..... 399

Copy Editor Iu.A. Zaikina  
Graphic Designer Iu.N. Efremova  
Layout Designer Iu.A. Zaikina

### Address of the Editorial Board:

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation; tel.: +7 (495) 955-08-28; fax: +7 (495) 955-08-28; e-mail: [stmj@rudn.ru](mailto:stmj@rudn.ru); [i\\_mamieva@mail.ru](mailto:i_mamieva@mail.ru)

Printing run 250 copies. Open price

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at Publishing House of RUDN University  
3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation

© Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 2019  
© Cajamarca-Zuñiga D., photo on the cover of the journal  
(Ingalls Rink, New Haven, Connecticut, USA), 2019

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURESDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-339-344  
УДК 626.01/69.04

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка методики расчета напряженного состояния  
в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен уголкового типаО.Д. Рубин<sup>1</sup>, С.Е. Лисичкин<sup>2\*</sup>, Ф.А. Пащенко<sup>3</sup><sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», Российская Федерация, 125362, Москва, Строительный пр-д, 7А<sup>2</sup>ООО «Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике», Российская Федерация, 125364, Москва, ул. Свободы, д. 35, стр. 36<sup>3</sup>АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «ЛенАэроПроект»», Российская Федерация, 198095, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 122, лит. Б

\* cskte@mail.ru

## История статьи:

Поступила в редакцию: 13 августа 2019 г.

Доработана: 28 сентября 2019 г.

Принята к публикации: 01 октября 2019 г.

## Аннотация

Подпорные стены уголкового типа широко распространены в гидротехническом строительстве. Им свойственны крупные габариты, небольшие проценты армирования, блочная разрезка по высоте конструкции. Основная масса существующих подпорных стен строилась в 1960–1980-х годах. Действовавшие в этот период нормативные документы имели определенные недостатки, которые вызвали непроектное поведение целого ряда подпорных стен. Требуется совершенствование методик расчета железобетонных конструкций подпорных стен, в рамках которых необходим более полный учет характерных особенностей их поведения. **Целью** работы является совершенствование методов расчета железобетонных подпорных стен уголкового типа. **Методы** исследований, проводимых для совершенствования расчета железобетонных подпорных стен уголкового типа, включали классические методы сопротивления материалов, теории упругости, строительной механики. Для определения фактического напряженно-деформированного состояния натуральных конструкций подпорных стен применялись визуальные и инструментальные методы обследования подпорных стен, в том числе метод разгрузки арматуры. **Результаты.** Для определения напряженного состояния в элементах железобетонной конструкции подпорной стены (в бетоне и арматуре) была разработана методика расчета напряженного состояния подпорных стен, которая позволяет определять компоненты напряженного состояния (напряжения в бетоне сжатой зоны, а также напряжения в растянутой и сжатой арматуре) в горизонтальных сечениях вертикальной консольной части подпорных стен.

**Ключевые слова:** гидротехнические подпорные стены уголкового типа; характерные особенности; межблочные горизонтальные швы; трещинообразование; внецентренное сжатие; сжимающие и растягивающие напряжения; методика расчета

## Для цитирования

Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пащенко Ф.А. Разработка методики расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен уголкового типа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 339–344. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-339-344>

## Введение

Подпорные стены являются неотъемлемыми составляющими гидроузлов. Они предназначены для

удерживания от обрушения и сползания находящихся за ними массивов грунта. Наиболее распространены подпорные стены уголкового типа [1–6].

Подпорные стены имеют горизонтальную фундаментную плиту с лицевой и более протяженной тыловой консолями; вертикальную консольную часть.

К конструктивным особенностям подпорных стен следует отнести значительные размеры (такие как высота вертикальной консоли стены, вылеты лицевой и тыловой консолей фундаментной

Рубин Олег Дмитриевич, доктор технических наук, директор филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС».

Лисичкин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, заместитель генерального директора.

Пащенко Федор Александрович, генеральный директор.

© Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пащенко Ф.А., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

плиты, размеры в корневом сечении и толщина фундаментной плиты, достигающие нескольких метров); бетон невысокой марки (М100–М250); арматуру большого диаметра (до 60 мм) классов А-II, А-III; невысокое содержание арматуры (как правило, менее одного процента); обязательное наличие горизонтальных межблочных швов, разделяющих горизонтальные блоки бетонирования при поэтапном возведении и др.

Со стороны тыловой грани, как правило, имеющей наклон, подпорные стены засыпаются грунтом, создающим основные нагрузки на конструкцию.

Ввиду вышесказанного вертикальные консольные части подпорных стен работают в условиях внецентренного сжатия. Вертикальная нагрузка создается собственным весом железобетона конструкции, весом грунта засыпки и грунтовых вод. Горизонтальная нагрузка создается боковым давлением грунта засыпки и грунтовых вод в засыпке.

Следует отметить, что большинство подпорных стен проектировалось и строилось до 2000-х годов (в основном в 1960–1970-х годах). В указанный период времени не учитывались некоторые характерные особенности работы подпорных стен, которые обусловлены их конструктивными особенностями (в первую очередь наличием горизонтальных межблочных швов).

Нормативные документы, которые действовали в период проектирования и строительства большинства подпорных стен [17–19], не учитывали всех особенностей их работы, вследствие чего при эксплуатации многих подпорных стен возникли отклонения от проектных предпосылок.

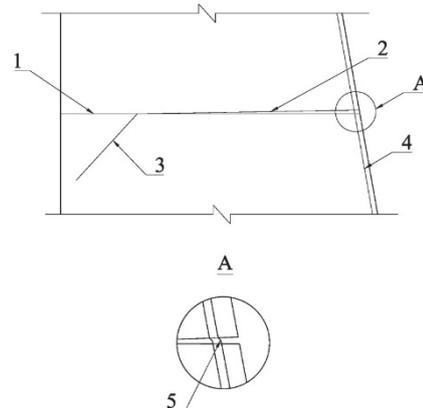
## 1. Обсуждение

Указанные выше отклонения от проектного поведения выражались в основном в смещениях верха консолей, ширине раскрытия горизонтальных межблочных швов, высоких сжимающих и растягивающих напряжениях в вертикальной арматуре у лицевой и тыловой граней, которые превышали проектные значения. В отдельных случаях происходило разрушение подпорных стен [7–10], в том числе левых стен первого яруса водоприемника строящейся Загорской ГАЭС [7–9].

Как уже было отмечено, основной причиной непроектного поведения подпорных стен явился неполный учет наличия межблочных горизонтальных строительных швов, характера трещинообразования, а также недостаточное поперечное горизонтальное армирование [11; 12; 20; 21].

Особый характер трещинообразования, выражающийся в образовании наклонных трещин, выходя-

щих из раскрывшихся горизонтальных межблочных швов, представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Фактическая схема трещинообразования в зоне горизонтального межблочного шва:  
1 – горизонтальный межблочный шов; 2 – раскрытие шва;  
3 – наклонная трещина; 4 – рабочая арматура;  
5 – деформация арматуры в раскрытом шве  
[Figure 1. The actual scheme of cracking in the zone of horizontal interlock seam:  
1 – horizontal interlock seam; 2 – opening of the seam;  
3 – inclined crack; 4 – working reinforcement;  
5 – deformation of the reinforcement in the open seam]

Следует отметить, что большинство проведенных ранее работ посвящено исследованиям нагрузок от давления грунта на подпорные стены, а также устойчивости подпорных стен [3], в то время как один из важнейших вопросов заключается в определении прочности конструкций стен как при проектировании [6], так и при определении фактического состояния конструкций после длительной эксплуатации.

Требуется совершенствование методик расчета прочности (включая назначение армирования) и положений нормативных документов при более полном учете особенностей массивных железобетонных конструкций ГТС (в первую очередь межблочных строительных швов).

## 2. Материалы и методы исследований

С целью определения фактического состояния конструкций подпорных стен проводились визуальные и инструментальные обследования подпорных стен, в том числе определение фактических напряжений в стержневой арматуре методом разгрузки арматуры [16]. Визуальные обследования проводились с применением микроскопа отсчетного МПБ-3, лазерного дальномера, рулеток, штангенциркуля и пр. В рамках инструментальных обследований проводилось определение прочности бетона подпорных стен неразрушающими метода-

ми: ультразвуковым методом (с применением ультразвукового прибора Пульсар-2.2) и методом упругого отскока (с применением молотка Шмидта).

Определение фактических напряжений в арматурных стержнях подпорных стен проводилось методом разгрузки арматуры.

Аналитические исследования напряженного состояния железобетонных конструкций подпорных стен проводились с применением методов строительной механики, сопротивления материалов, теории железобетона.

### 3. Результаты обследований подпорных стен и разработка методики их расчета

В ходе обследований лицевой поверхности ряда подпорных стен гидротехнических сооружений были выявлены горизонтальные трещины, которые являлись следами выхода на лицевую поверхность наклонных трещин, выклинивающихся из горизонтальных межблочных швов.

В ходе инструментальных обследований методом разгрузки арматуры в вертикальной арматуре у лицевой грани ряда подпорных стен были выявлены значительные сжимающие напряжения, превышающие проектные значения.

Для определения напряженного состояния в элементах железобетонной конструкции подпорной стены (в бетоне и арматуре) была разработана методика расчета напряженного состояния подпорных стен.

При этом рассматривалось горизонтальное сечение в вертикальной консоли стены. Определялись внешние усилия, действующие в расчетном сечении:  $N$  – вертикальная сжимающая сила и  $M$  – изгибающий момент. В сечении действуют внутренние усилия: усилие в бетоне сжатой зоны –  $N_b$ ; в сжатой арматуре –  $N'_s$ ; в растянутой арматуре –  $N_s$ .

Условие равновесия при действии сил:

$$N_b + N'_s = N + N_s. \quad (1)$$

Условие равновесия при действии изгибающих моментов (относительно равнодействующей вертикальных сжимающих напряжений в бетоне сжатой зоны):

$$N(e_0 - 0,5h + 0,33x) = N_s(h_0 - 0,33x) + N'_s(0,33x - a') \quad (2)$$

Схема действия нагрузок в горизонтальном сечении представлена на рис. 2.

Принималась треугольная эпюра продольных сжимающих напряжений в бетоне, как для массивных бетонных конструкций, работающих в стадии эксплуатации, не достигающей предельного со-

стояния, что соответствует положениям СНиП 52-01-2003.

При разработке указанной методики была применена гипотеза плоских сечений, на основе которой установлены зависимости между относительными деформациями в бетоне сжатой зоны  $\epsilon_b$ , в растянутой ( $\epsilon_s$ ) и сжатой ( $\epsilon'_s$ ) арматуре.

Напряжения в бетоне сжатой зоны  $\sigma_b$ , в растянутой  $\sigma_s$  и сжатой  $\sigma'_s$  арматуре определялись путем умножения величин относительных деформаций ( $\epsilon_b, \epsilon_s, \epsilon'_s$ ) на соответствующие значения модуля деформаций бетона и арматуры ( $E_b$  и  $E_s$ ).

$$\sigma_b = \epsilon_b \cdot E_b; \quad \sigma_s = \epsilon_s \cdot E_s; \quad \sigma'_s = \epsilon'_s \cdot E_s. \quad (3)$$

Эпюры деформаций и напряжений в арматуре и бетоне расчетного горизонтального сечения представлены на рис. 3.

Распределение вертикальных сжимающих напряжений  $\sigma_b$  в бетоне сжатой зоны конструкции подпорной стены принималось по линейному (треугольному) закону (рис. 2).

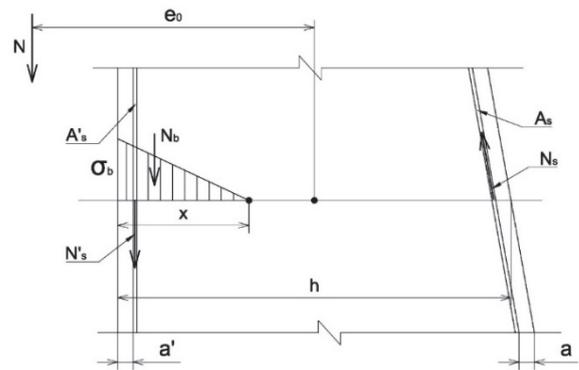


Рис. 2. Схема действия нагрузок в горизонтальном сечении [Figure 2. Diagram of the action of loads in a horizontal section]

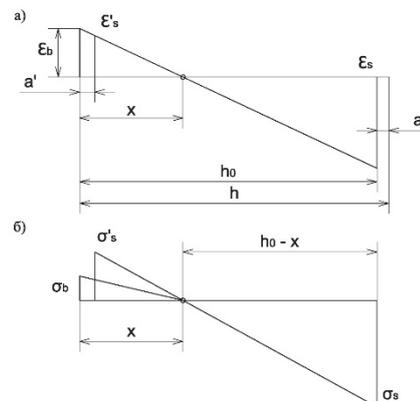


Рис. 3. Эпюры деформаций (а) и напряжений (б) в нормальном горизонтальном сечении [Figure 3. Diagrams of deformations (a) and stresses (b) in a normal horizontal section]

Предполагаются дальнейшие исследования в направлении совершенствования методов расчета железобетонных подпорных стен углового типа, в том числе с учетом сопротивления горизонтальных межблочных швов [13–15], влияния наклона тыловой грани [16], нагельного сопротивления арматурных стержней сдвигу.

После проведения соответствующих преобразований и решения системы двух уравнений имеем:

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} = \frac{x}{h_0 - x}; \quad \varepsilon_b = \left(\frac{x}{h_0 - x}\right) \varepsilon_s.$$

$$\frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon_s} = \frac{(x - a)}{(h_0 - x)}; \quad \varepsilon'_s = \frac{(x - a)}{(h_0 - x)} \varepsilon_s.$$

$$\sigma_b = \left(\frac{x}{h_0 - x}\right) \varepsilon_s; \quad E_b = \left(\frac{x}{h_0 - x}\right) \sigma_s \frac{E_b}{E_s}. \quad (4)$$

$$\sigma'_s = \frac{(x - a)}{(h_0 - x)}. \quad (5)$$

Напряжения в растянутой арматуре  $\sigma_{st}$  находим по формуле

$$\sigma_s = \frac{N(h_0 - x)}{D},$$

где

$$D = \left[0,5bx^2 \left(\frac{E_b}{E_s}\right) + A'_s(x - a') - A_s(h_0 - x)\right]. \quad (6)$$

Напряжения в растянутой арматуре  $\sigma_s$  без учета сжатой арматуры находим по формуле

$$\sigma_{st} = \frac{N}{\left[0,5\left(\frac{x}{h_0 - x}\right)\frac{E_b}{E_s}\right]xb - A_s}, \quad (7)$$

где  $x$  – высота сжатой зоны бетона.

### Заключение

Выполнен анализ конструктивных особенностей подпорных стен гидротехнических сооружений (которые определяют характер их работы), в том числе вызывающих отклонения от проектных предпосылок при эксплуатации.

Установлено, что нормативные документы, действовавшие в период проектирования большинства подпорных стен гидротехнических сооружений, не в полной мере учитывали характерные особенности таких сооружений (в первую очередь наличие межблочных контактных швов), что приводило к отклонениям от проектных предпосылок.

В результате проведенных исследований была разработана методика, позволяющая определять компоненты напряженного состояния (напряжения в бетоне сжатой зоны, а также напряжения в растянутой и сжатой арматуре) в горизонтальных сечениях вертикальной консольной части подпорных стен.

### Список литературы

1. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С., Малаханов В.В., Толстиков В.В., Орехов В.Г., Саинов М.П., Анискин Н.А., Солдатов П.В. Гидротехнические сооружения (речные). Ч. 2. М.: ЛитРес, 2016. 538 с.
2. Волосухин В.А., Дыба В.П., Евтушенко С.И. Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений. М.: АСВ, 2015. 96 с.
3. Снегирева А.И., Мурашкин В.Г. Проектирование железобетонных и каменных подпорных стен: учебное пособие. Самара: Самарск. гос. арх.-строит. ун-т, 2007. 106 с.
4. Волосухин В.А., Воропаев В.И., Яццкий Л.В. Расчет подпорных стен гидротехнических сооружений: учебное пособие. Новочеркасск, 2000. 81 с.
5. Семенюк С.Д., Котов Ю.Н. Железобетонные подпорные стены // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4 (61). С. 86–101.
6. Васильев П.И., Кононов Ю.И., Чирков Я.Н. Железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Киев: Вища школа, 1982. 320 с.
7. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Нефедов А.В., Черненко В.Н., Пономарев Д.И., Мукашов Р.З., Лисичкин А.С. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорной стенки первого яруса ЛВ-1 водоприемника Загорской ГАЭС, в том числе с учетом данных синхронных замеров при суточном изменении уровня верхнего аккумулирующего бассейна // Безопасность энергетических сооружений. 2013. Вып. 18. С. 38–50.
8. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Атабиев И.Ж., Мельникова Н.И. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // Природообустройство. 2012. № 2. С. 44–48.
9. Рубин О.Д., Пономарев Д.И., Мельникова Н.И. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // Природообустройство. 2011. № 5. С. 51–55.
10. Fedorova N.V., Gubanova M.S. Crack-resistance and strength of a contact joint of a reinforced concrete composite wall beam with corrosion damages under loading // Russian journal of building construction and architecture. 2018. No. 2(38). Pp. 6–18.
11. Николаев В.Б., Гун С.Я., Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б. Прочность железобетонных подпорных стенок // Гидротехническое строительство. 1988. № 10. С. 54–58.
12. Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б. Поперечное армирование массивных конструкций энергетических сооружений // Энергетическое строительство. 1989. № 11. С. 40–43.
13. Лисичкин С.Е., Королев Л.В., Скворцов А.Г. Совершенствование расчета железобетонных конструкций, ослабленных продольными строительными швами // Строительство и архитектура. Серия: Строительные конструкции и материалы. 1999. Вып. 3. С. 1–4.
14. Лисичкин С.Е., Скворцов А.Г. Повышение безопасности массивных железобетонных конструкций с контактными строительными швами // Гидротехническое строительство. 2000. № 6. С. 17–21.

15. Лисичкин С.Е. Повышение надежности конструкций ТЭС, имеющих контактные швы, с учетом сопротивления арматуры сдвигу // Безопасность энергетических сооружений. 2001. Вып. 9. С. 43–60.

16. Залесов А.С., Лисичкин С.Е. Расчет конструкций с наклонной гранью // Гидротехническое строительство. 1992. № 6. С. 48–50.

17. СН 55-59. Нормы и технические условия проектирования бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений / Гос. ком-т Совета Министров СССР по делам строительства. М.: Госстройиздат, 1959. 63 с.

18. СНиП II-И.14-69. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1970. 47 с.

19. СНиП II-56-77. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1977. 32 с.

20. СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоводные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87.

21. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87.

RESEARCH PAPER

## Development of a method for calculating the stress state in horizontal sections of hydraulic engineering angular-type retaining walls

Oleg D. Rubin<sup>1</sup>, Sergey E. Lisichkin<sup>2\*</sup>, Fedor A. Pashenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Scientific Research Institute of Energy Structures, 7A Stroitel'nyy proyezd, Moscow, 125362, Russian Federation

<sup>2</sup>Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Power Engineering, Ltd, 35 Svobody St., bldg. 36, Moscow, 125364, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC "LenAeroProect", 122 Obvodnogo kanala embankment, litera B, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

\* cskte@mail.ru

### Article history:

Received: August 13, 2019

Revised: September 28, 2019

Accepted: October 01, 2019

### Abstract

Angular retaining walls are widespread in hydraulic engineering. They are characterized by large dimensions, small percentages of reinforcement, block cutting along the height of the structure. The bulk of the existing retaining walls were built in the 1960s–1980s. The regulatory documents that were in force during this period had certain shortcomings that caused the non-design behavior of a number of retaining walls. Improvement of calculation methods for reinforced concrete structures of retaining walls is required, within the framework of which a more complete account of the characteristic features of their behavior is needed. **The aim of the work** is to improve methods for calculating reinforced concrete retaining walls of a corner type. **Methods** of research carried out to improve the calculation of reinforced concrete retaining walls of the corner type included, among others, the classical methods of resistance of materials, the theory of elasticity, and structural mechanics. To determine the actual stress-strain state of the natural structures of retaining walls, visual and instrumental methods for examining retaining walls were used, including the method of unloading reinforcement. **Results.** To determine the stress state in the elements of the reinforced concrete structure of the retaining wall (in concrete and in reinforcement), a methodology was developed for calculating the stress state of retaining walls, which allows to determine the components of the stress state (stress in concrete in the compressed zone, as well as stress in stretched and compressed reinforcement) in horizontal sections of the vertical cantilever part of the retaining walls.

**Keywords:** hydraulic engineering retaining walls of a corner type; characteristic feature; interblock horizontal seams; cracking; eccentric compression; compressive and tensile stresses; calculation method

### For citation

Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashenko F.A. (2019). Development of a method for calculating the stress state in horizontal sections of hydraulic engineering angular-type retaining walls. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 339–344. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-339-344>. (In Russ.)

### References

1. Rasskazov L.N., Bestuzheva A.S., Malakhanov V.V., Tolstikov V.V., Orekhov V.G., Sainov M.P., Aniskin N.A.,

Soldatov P.V. (2016). *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya (rechnye). Ch. 2 [Hydrotechnical structures (river) Part 2]*. Moscow: LitRes Publ. (In Russ.)

2. Volosuhin V.A., Dyba V.P., Evtushenko S.I. (2008). *Raschet i proektirovanie podpornykh sten gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Calculation and design of retaining walls of hydraulic structures]*. Moscow: ASV Publ. (In Russ.) <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930935455.html>

**Oleg D. Rubin**, Doctor of Technical Sciences, Director of a branch of JSC "Institute Hydroproject" – NIIES.

**Sergey E. Lisichkin**, Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director.

**Fedor A. Pashenko**, General Director.

3. Snegireva A.I., Murashkin V.G. (2007). *Proektirovaniye zhelezobetonnykh i kamennykh podpornykh sten: uchebnoe posobie [Design of reinforced concrete and stone retaining walls: Study guide]*. Samara: University of Architecture and Civil Engineering. (In Russ.)
4. Volosuhin V.A., Voropaev V.I., Yaickij L.V. (2000). *Raschet podpornykh sten gidrotekhnicheskikh sooruzhenij: uchebnoe posobie [Calculation of the retaining walls of hydraulic structures: Study guide]*. Novocheboksarsk. (In Russ.)
5. Semenyuk S.D., Kotov Yu.N. (2018). Reinforced concrete retaining walls. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 4(61), 86–101.
6. Vasil'ev P.I., Kononov Yu.I., Chirkov Ya.N. (1982). *Raschet podpornykh sten gidrotekhnicheskikh sooruzhenij: uchebnoe posobie [Reinforced concrete structures of hydraulic structures: Study guide]*. Kiev: Vishcha shkola Publ. (In Russ.)
7. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Nefedov A.V., Chernenko V.N., Ponomarev D.I., Mukashov R.Z., Lisichkin A.S. (2013). Raschetnyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podpornoj stenki pervogo yarusa LV-1 vodopriemnika Zagorskoj GAES, v tom chisle s uchetoм dannyh sinhronnyh zamerov pri sutochnom izmenenii urovnya verhnego akumuliruyushchego bassejna [Computational studies of the stress-strain state of the retaining wall of the first tier LV-1 of the receiving water of the Zagorskaya PSPP, including taking into account the data of synchronous measurements with daily changes in the level of the upper storage pool]. *Bezopasnost' energeticheskikh sooruzheniy*, (18), 38–50. (In Russ.)
8. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Atabiev I.Zh., Mel'nikova N.I. (2012). Raschetnyye issledovaniya ustojchivosti i prochnosti podpornykh sten pervogo yarusa vodopriemnika Zagorskoj GAES [Computational studies of the stability and strength of the retaining walls of the first tier of the receiving basin of the Zagorsk PSP]. *Prirodoobustrojstvo*, (2), 44–48. (In Russ.)
9. Rubin O.D., Ponomarev D.I., Mel'nikova N.I. (2011). Raschetnyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podpornykh sten pervogo yarusa vodopriemnika Zagorskoj GAES [Computational studies of the stress-strain state of the retaining walls of the first tier of the receiving water of the Zagorsk PSPP]. *Prirodoobustrojstvo*, (5), 51–55. (In Russ.)
10. Fedorova N.V., Gubanova M.S. (2018). Crack-resistance and strength of a contact joint of a reinforced concrete composite wall beam with corrosion damages under loading [Crack-resistance and strength of a contact joint of a reinforced concrete composite wall beam with corrosion damages under loading]. *Russian journal of building construction and architecture*, 2(38), 6–18. (In Russ.)
11. Nikolaev V.B., Gun S.Ya., Lisichkin S.E., Lyapin O.B. (1988). Prochnost' zhelezobetonnykh podpornykh stenok [Strength of reinforced concrete retaining walls]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, (10), 54–58. (In Russ.)
12. Lisichkin S.E., Lyapin O.B. (1989). Poperechnoe armirovaniye massivnykh konstrukcij energeticheskikh sooruzhenij [Transverse reinforcement of massive structures of power facilities]. *Energeticheskoye stroitel'stvo*, (11), 40–43. (In Russ.)
13. Lisichkin S.E., Korolev L.V., Skvorcov A.G. (1999). Sovershenstvovaniye rascheta zhelezobetonnykh konstrukcij, oslablennykh prodol'nymi stroitel'nymi shvami [Improving the calculation of reinforced concrete structures weakened by longitudinal construction seams]. *Construction and architecture. Series: Building designs and materials*, (3), 1–4. (In Russ.)
14. Lisichkin S.E., Skvorcov A.G. (2000). Povysheniye bezopasnosti massivnykh zhelezobetonnykh konstrukcij s kontaktnymi stroitel'nymi shvami [Improving the safety of massive reinforced concrete structures with contact building joints]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, (6), 17–21. (In Russ.)
15. Lisichkin S.E. (2001). Povysheniye nadezhnosti konstrukcij TES, imeyushchih kontaktnyye shvy, s uchetoм soprotivleniya armatury sdvigu [Improving the reliability of designs of thermal power plants with contact seams, taking into account the resistance of reinforcement to shear]. *Bezopasnost' energeticheskikh sooruzheniy*, (9), 43–60. (In Russ.)
16. Zalesov A.S., Lisichkin S.E. (1992). Raschet konstrukcij s naklonnoj gran'yu [Calculation of structures with an inclined edge]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, (6), 48–50. (In Russ.)
17. SN 55-59. (1959). *Normy i tekhnicheskiye usloviya proyektirovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Standards and technical conditions for the design of concrete and reinforced structures of hydraulic structures]*. Moscow: Gosstroyizdat. (In Russ.)
18. SNiP II-I.14-69. (1970). *Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktsii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Normy proyektirovaniya [Concrete and reinforced structures of hydraulic structures. Design Standards]*. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.)
19. SNiP II-56-77. (1977). *Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktsii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Concrete and reinforced structures of hydraulic structures]*. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.)
20. SP 101.13330.2012. (2012). *Podpornyye steny, sudokhodnyye shlyuzy, rybopropusknyye i rybozashchitnyye sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.07-87 [Retaining walls, shipping gateways, fishways and fish screen structures. Updated edition of SNiP 2.06.07-87]*. (In Russ.)
21. SP 41.13330.2012. (2012). *Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktsii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.08-87 [Concrete and reinforced structures of hydraulic structures. Updated version of SNiP 2.06.08-87]*. (In Russ.)

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-345-352  
УДК 624.11

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Концепция разработки программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности

П.М. Саламахин<sup>1\*</sup>, А.Д. Часовников<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт мостов и гидротехнических сооружений, Российская Федерация, 129329, Москва, Изгарский пр-д, д. 2, стр. 1

\*pavel-salamahin@mail.ru

### История статьи:

Поступила в редакцию: 08 июля 2019 г.

Доработана: 01 октября 2019 г.

Принята к публикации: 10 октября 2019 г.

### Аннотация

В статье на основе обобщения опыта создания в период с 1997 по 2015 год программ автоматизированного проектирования разнообразных мостовых сооружений пятнадцатью аспирантами кафедры мостов и транспортнх тоннелей МАДИ (ГТУ) под руководством д.т.н., профессора П.М. Саламахина предлагается концепция разработки структуры типовых программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности. Приводится в самом общем виде полная блок-схема таких программ с детальным раскрытием в ней работы индикатора одновременного выполнения комплекса требований во всех элементах сооружения с зависимыми размерами в ходе последовательного их приближения к минимально возможным значениям, а также демонстрируется способ определения комбинации значений всех независимых параметров сооружения, обеспечивающей проектирование сооружения по задаваемому критерию оптимальности. При работе над статьей учтены некоторые положения ранее проведенных исследований и состояние разработки автоматизации проектирования мостовых сооружений за рубежом. Авторы исходят из того, что предлагаемая концепция разработки программ автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности может и должна быть использована в качестве образца при разработке программ автоматизированного проектирования сооружений с различными обобщенными конструктивными схемами.

**Ключевые слова:** мостовые и инженерные сооружения; обобщенные конструктивные схемы; зависимые размеры и независимые их параметры; критерий оптимальности сооружения; автоматизированное проектирование; типовая блок-схема программ проектирования

### Для цитирования

Саламахин П.М., Часовников А.Д. Концепция разработки программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений по задаваемому критерию оптимальности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 345–352. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-345-352>

## Введение

В настоящее время в проектных организациях Российской Федерации при проектировании мостовых сооружений для определения напряженно-

деформированного состояния в их элементах от совместного воздействия собственного их веса и максимально возможного воздействия временной нагрузки широко используются расчетные комплексы, основанные на использовании метода конечных элементов: Sophistic, Midas, Nastran и другие. При создании расчетной модели для проектируемого сооружения размеры его элементов с их использованием ориентировочно задают вручную без возможности их последующего автоматизированного изменения при дальнейшем расчете. Получаемые в этих случаях при расчете усилия и деформации в элементах сооружения строго со-

Саламахин Павел Михайлович, ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, академик РАТ. eLIBRARY SPIN-код: 2596-3649. SCOPUS iD: 6504210104.

Часовников Антон Дмитриевич, ведущий инженер отдела обследования и испытаний мостов.

© Саламахин П.М., Часовников А.Д., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ответствуют заданным размерам, но заданные размеры сооружения могут не удовлетворять комплексу разнообразных требований: прочности, жесткости, местной или общей устойчивости, трещиностойкости и конструктивным требованиям. Это требует корректировки размеров сооружения методом последовательных приближений к необходимым минимально возможным размерам в ходе многошагового итерационного процесса вычислений с вновь автоматически задаваемыми размерами с целью обеспечения одновременного удовлетворения комплексу требований к размерам во всех элементах сооружения. Эффективный способ [1–4] определения момента одновременного удовлетворения комплексу требований во всех элементах мостовых сооружений с зависимыми размерами использовался по рекомендации доктора технических наук, профессора П.М. Саламахина аспирантами в МАДИ при разработке пятнадцати программ автоматизированного проектирования разнообразных автодорожных мостовых сооружений [5–19] и в их научных публикациях [20–25]. Эти способы в настоящее время не используются в известных, продаваемых на мировом рынке расчетных комплексах Sophistic, Midas, Nastran и других, рекомендуемых для проектирования разнообразных мостовых сооружений, что при их использовании не обеспечивает получение проектных решений с одинаковой надежностью их элементов. Кроме того, этими расчетными комплексами, рекомендуемыми на мировом рынке в качестве программ проектирования мостовых сооружений, не предусматривается оптимизация численных значений независимых параметров сооружения, при которых сооружения удовлетворяют задаваемому критерию их оптимальности. Обычно проектируются мостовые сооружения с произвольно назначаемыми значениями их независимых параметров, что не способствует получению экономически целесообразных решений.

Для того чтобы существующие расчетные комплексы могли быть использованы как эффективные программы автоматизированного проектирования экономически целесообразных конструктивных решений мостовых сооружений, их следует оснащать способами определения момента одновременного удовлетворения комплексу требований во всех элементах мостовых сооружений с зависимыми размерами и способом получения оптимальных комбинаций значений независимых параметров сооружения, соответствующих задаваемому критерию его оптимальности, что будет способствовать автоматизированному получению экономически целесообразных конструктивных ре-

шений. При анализе известных зарубежных работ [26–34] по автоматизации проектирования мостовых сооружений в работе [18] не выявлены эффективные способы оптимизации независимых параметров мостовых сооружений по задаваемому критерию оптимальности.

### Основы создания типовых программ автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений по задаваемому критерию их оптимальности

1. Разработку программы автоматизированного проектирования мостового или иного инженерного сооружения следует начинать с создания обобщенной конструктивной схемы сооружения определенного его класса в виде графической модели возможных конструктивных решений, относящихся к одному классу сооружений. Класс мостовых конструкций объединяет множество их конструктивных решений, имеющих одинаковую конструктивную форму, но различающихся размерами и параметрами.

Обобщенная схема конструктивного решения моста определенного класса должна включать следующую информацию: возможные типы поперечных сечений пролетных строений, возможный тип решения элементов мостового полотна (одежда мостового полотна, перильное и защитное ограждение, деформационные швы).

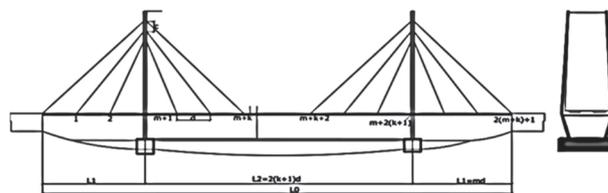


Рис. 1. Обобщенная конструктивная схема вантового моста [Figure 1. Generalized structural scheme of cable-stayed bridge]

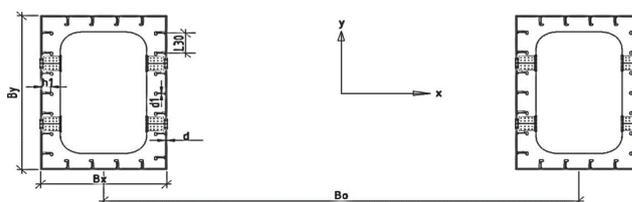
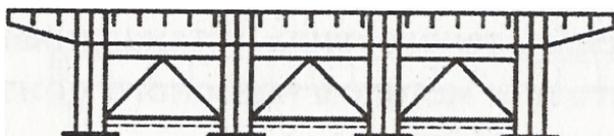
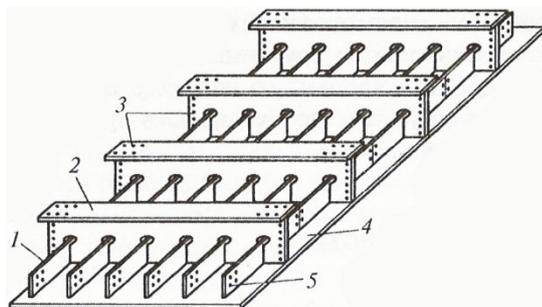


Рис. 2. Обобщенная конструктивная схема поперечного сечения пилонов вантового моста [Figure 2. Generalized structural scheme of cross-section of cable-stayed bridge pylons]



**Рис. 3.** Обобщенная конструктивная схема поперечного сечения балки жесткости вантового моста  
[Figure 3. Generalized structural diagram of the cross-section of the cable-stayed bridge stiffness beam]



**Рис. 4.** Обобщенная конструктивная схема блока ортотропной плиты проезжей части на балке жесткости вантового моста  
[Figure 4. Generalized structural diagram of the orthotropic slab of the carriageway block on the stiffness beam of the cable-stayed bridge]

2. На этапе разработки системы исходных данных необходимо определить полный перечень и содержание исходной информации, необходимой для проектирования моста, вписывающегося в принятую обобщенную конструктивную форму сооружения. В нее должны войти данные о требуемом габарите моста, о временных нагрузках, о материалах.

3. Определение перечня всех параметров и размеров сооружения, которые подлежат установлению и необходимы для выполнения чертежа проектируемого сооружения. При этом необходимо выделить среди них независимые размеры или параметры, так называемые переменные проектирования, и зависимые размеры, численные значения которых принимают единственное значение при заданной временной нагрузке и установленных значениях независимых параметров. Отличительной особенностью зависимых размеров является то, что для нахождения каждого из них имеется вполне

определенное условие прочности или комплекс условий (прочности, жесткости, местной или общей устойчивости, конструктивные требования).

Примеры зависимых размеров: толщина листа настила проезжей части зависит от расстояния между продольными балками, толщины стенок продольных и поперечных ребер проезжей части, стенок и размеров поясов поперечных и главных балок, зависящих от их высот.

Отличительной особенностью независимых параметров и размеров является то, что оптимальные их значения могут быть определены по общему для всех их условию: комплекс их значений должен обеспечить получение сооружения, удовлетворяющего критерию оптимальности.

Примерами независимых параметров и размеров сооружения являются: количество главных балок в поперечном сечении пролетного строения, расстояния между продольными и поперечными балками проезжей части, высоты главных и поперечных балок в сооружении.

При принятой системе независимых параметров поиск их оптимальных значений можно произвести с помощью организации циклов по изменению их численных значений, с тем чтобы найти такую комбинацию их значений, при которой, например, суммарная стоимость сооружения будет минимальной.

4. Определение перечня данных о результатах проектирования и способа их выдачи компьютером. К этому перечню обычно относят размеры всех элементов сооружения, данные о напряженно-деформированном состоянии всех элементов сооружения, технико-экономические показатели элементов и сооружения в целом.

5. Разработка блок-схемы программы автоматизированного проектирования сооружения и самой программы с использованием предлагаемой в п. 6 типовой блок-схемы и учетом особенностей конструктивной формы проектируемого сооружения.

6. Типовая блок-схема программ автоматизированного проектирования мостовых или иных инженерных сооружений (см. 6.1–6.17).

#### 6.1. Ввод системы исходных данных:

- количество зависимых размеров сооружения  $mzr$ ;
- количество независимых параметров – размеров  $mnzr$ ;
- количество независимых параметров сооружения  $mnpzr$ ;
- сведения о временных нагрузках;
- сведения об используемых материалах;
- сведения о начальных значениях зависимых размеров  $d(i)$  элементов сооружения при  $I$  от 1 до  $mzr$ .



6.2. Ввод значения критерия оптимальности сооружения – в качестве его минимального значения  $GRIT_{min} = 10^{50}$ .

6.3. Начало циклов по количеству и диапазону значений каждого из  $mnpz$  независимых параметров сооружения.

6.4. Начало циклов по количеству и диапазону значений каждого из  $mnpz$  независимых размеров – параметров сооружения.

6.5. Обнуление ячеек матрицы  $M(mzp,2)$  индикатора обнаружения момента строгого определения всех минимально возможных значений зависимых размеров при установленных во внешних циклах значениях независимых размеров-параметров и независимых параметров сооружения в ходе последовательного приближения к искомому размеру по условиям прочности жесткости и устойчивости.

6.6. Вычисление собственного веса сооружения с учетом веса элементов сооружения с зависимыми размерами.

6.7. Создание расчетной схемы сооружения для определения в его элементах усилий от собственного веса и критического положения временной нагрузки.

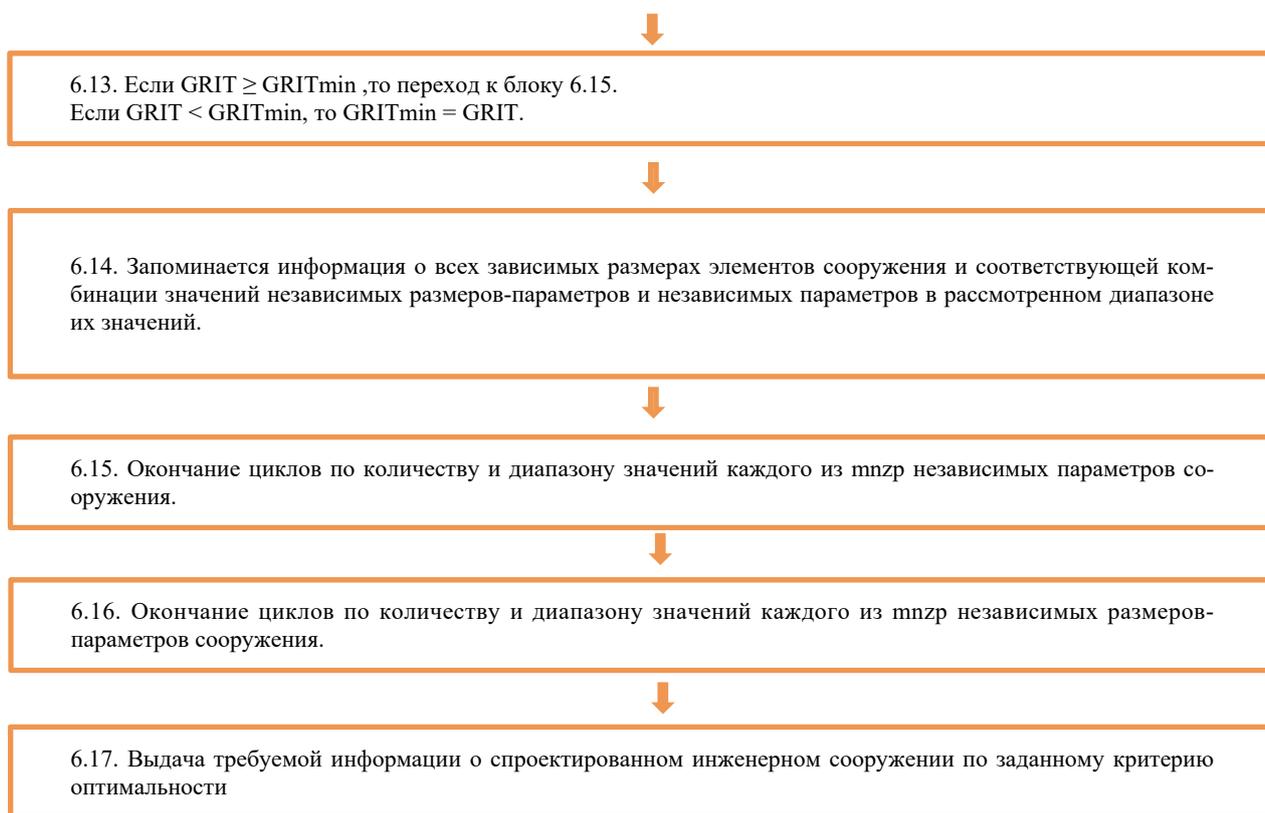
6.8. Вычисление усилий в элементах сооружения с зависимыми размерами.

6.9. Вычисление напряжений  $\sigma(i)$  при  $i$  от 1 до  $mzp$  в критических точках элементов с зависимыми размерами.

6.10. Цикл по сравнению напряжений  $\sigma(i)$  в элементах с зависимыми размерами при  $i$  от 1 до  $mzp$  и корректировка их размеров при  $\Delta d(i)$ .  
 Если  $\sigma(i) > R(I)$ , то:  
 – принять  $d(i) = d(i) + \Delta d(i)$ ;  
 – послать 1 в  $M(i,1)$  и уйти на следующий шаг цикла.  
 Если  $\sigma(i) < R(I)$ , то:  
 – принять  $d(i) = d(i) - \Delta d(i)$ ;  
 – послать 1 в  $M(i,2)$  и уйти на следующий шаг цикла.

6.11. Вычисление суммы единиц в матрице индикатора завершения определения необходимых зависимых размеров, сравнение ее с числом  $2 mzp$ .  
 Если эта сумма  $< 2 mzp$ , то необходим возврат к блоку 6.6, в противном случае осуществляется переход к блоку 6.12.

6.12. Вычисляется критерий оптимальности сооружения  $MGRIT$ .



### Заключение

Авторы считают, что предлагаемая блок-схема программ автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений может и должна быть использована в качестве образца при разработке программ автоматизированного проектирования сооружений с различными обобщенными конструктивными схемами по задаваемому критерию оптимальности.

Детализация блоков 6.6–6.8 предложенной блок-схемы должна производиться разработчиками программ с учетом особенностей обобщенной конструктивной схемы проектируемого сооружения.

Целью этой работы является стремление авторов создать основы концепции автоматизированного проектирования мостовых и иных инженерных сооружений по задаваемому критерию их оптимальности, последующее использование которой позволит проектировать экономически целесообразные мостовые и иные инженерные сооружения.

### Список литературы

1. *Лианагама Джанака*. Разработка и обоснование рекомендаций по конструктивным решениям опор автодорожных мостов для условий Республики Шри-Ланка: дис. ... к.т.н. 1990. 136 с.

2. *Ле Тху Хьонг*. Оптимизация параметров пролетных строений висячих мостов при их проектировании с применением ПК: дис. ... к.т.н. 1999. 134 с.

3. *Новодзинский А.Л.* Совершенствование методики автоматизированного проектирования ортотропных плит проезжей части автодорожных мостов: дис. ... к.т.н. 2001. 166 с.

4. *Аует Луис*. Обоснование конструктивных форм и способов строительства автодорожных мостов в условиях Республики Конго: дис. ... к.т.н. 2002. 128 с.

5. *Фан Пинь*. Оптимизация гибкости сжатых элементов мостовых конструкций: дис. ... к.т.н. 2004. 152 с.

6. *Ализаде Шахрам Хое*. Оптимизация параметров двухпилонных металлических вантовых мостов при их автоматизированном проектировании с применением ПК: дис. ... к.т.н. 2003. 130 с.

7. *Нуен Нам Ха*. Автоматизация проектирования и оптимизация сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов: дис. ... к.т.н. 2006. 182 с.

8. *Нуен Тхак Куанг*. Совершенствование программы автоматизированного проектирования двухпилонных металлических вантовых мостов: дис. ... к.т.н. 2007. 141 с.

9. *Саламахин П.М., Ле Ван Мань*. Обобщенная конструктивная форма сталежелезобетонных двухпилонных вантовых автодорожных мостов и блок-схема программы автоматизации их проектирования // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2010. № 2. С. 60–65. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10894>

10. *Саламахин П.М., Чан Тхай Минь*. Обобщенная конструктивная форма трехпролетных металлических висячих автодорожных мостов и блок-схема програм-

мы автоматизации их проектирования // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 2. С. 65–71. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10895>

11. *Нгуен Мань Тхыонг*. Автоматизированное проектирование неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части: дис. ... к.т.н. 2011. 155 с.

12. *Зьонг Тхе Ань*. Автоматизированное проектирование разрезных железобетонных пролетных строений с напрягаемой арматурой: дис. ... к.т.н. 2011. 150 с.

13. *Ле Мань Хан*. Автоматизированное проектирование разрезных железобетонных пролетных строений с ненапрягаемой арматурой: дис. ... к.т.н. 2011. 155 с.

14. *Зайяр Минь Шве*. Обоснование рациональных параметров сталежелезобетонных двухпилонных вантовых мостов с вантами по схеме «веер»: дис. ... к.т.н. 2013. 144 с.

15. *Реиетников И.В.* Обоснование рациональных конструктивно-технологических решений деревометалло-железобетонных пролетных строений автодорожных мостов: дис. ... к.т.н. 2015. 139 с.

16. *Нгуен Мань Тхыонг*. Оптимизация параметров неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части // Вестник МАДИ. 2011. № 3 (26). С. 87–90.

17. *Нгуен Мань Тхыонг*. Основы программы автоматизированного проектирования неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части // Инженерные системы – 2011: тезисы докладов (Москва, 5–8 апреля 2011 г.). М.: РУДН, 2011. С. 84–85.

18. *Нгуен Мань Тхыонг*. Обобщенная конструктивная форма неразрезных металлических пролетных строений автодорожных мостов с ортотропной плитой проезжей части и блок-схема программы автоматизации их проектирования // Исследования мостовых и тоннельных сооружений: сб. науч. тр. М.: МАДИ (ГТУ), 2010. С. 62–66.

19. *Тхыонг Нгуен Мань*. Оптимизация параметров коробчатых металлических пролетных строений // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 3. С. 32–33.

20. *Саламахин П.М.* Проектирование мостовых и строительных конструкций. М.: КноРус, 2011. С. 343–357.

21. *Саламахин П.М.* Автоматизированное проектирование металлических двухпилонных вантовых мостов // Транспортное строительство. 2003. № 10. С. 15–19.

22. *Саламахин П.М.* Проблемы и концепция автоматизации проектирования и оптимизации конструк-

ции мостов // Транспортное строительство. 2004. № 4. С. 20–23.

23. *Саламахин П.М.* Метод обобщения закономерностей веса несущих конструкций. М., 1977. 106 с.

24. *Саламахин П.М., Реиетников И.В.* К выбору рациональных конструктивных форм деревометалло-железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2014. № 3. С. 45–48.

25. *Клевко В.И., Мусеева О.В., Новодзинский А.И.* Выбор оптимального грунта засыпки подземного пешеходного перехода из металлических гофрированных конструкций // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 102–114.

26. *Baldomir A., Hernandez S., Nieto F., Jurado J.A.* Cable optimization of a long span cable stayed bridge in La Coruña (Spain) // Advances in Structural Optimization. 2010. Vol. 41. Issues 7–8. Pp. 931–938. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997810000517>.

27. *Ashraf El Damatty, Olfat Sarhang Zadeh.* Comparison between three types of cable-stayed bridges using structural optimization. Canada: University of Western Ontario, 2012.

28. *Faella C., Martinell E., Nigro E.* Steel and concrete composite beams with flexible shear connection: “exact” analytical expression of the stiffness matrix and application // Computer & Struct. 2002. Vol. 80. No. 11. Pp. 1001–1009. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00038-X.

29. *Reddy J.N.* An introduction to the finite element method. McGraw Hill, International Edition, 1991.

30. *Simes L.M.C., Negro J.H.J.O.* Optimization of cable-stayed bridges with box-grid decks // Advances in Engineering Software. 2000. Vol. 31(6). Pp. 417–423. DOI: 10.1016/0965-9978(00)00003-X.

31. *Manabu Ito, Yozo Fujino, Toshio Miyata, Nobuyuki Narita.* Cable-stayed bridges recent developments and their future. Amsterdam – London – New York – Tokyo, 1991.

32. *Podolny W., Scalzi J.B.* Construction and design of cable-stayed bridges. New York, 1986.

33. *Tao Zhang, Zhi Min Wu.* Dead load analysis of cable-stayed bridges // International Conference on Intelligent Building and Management. 2011. Pp. 270–274.

34. *Yu Chi Sung, Dyi Wei Chang, Eng Huat Teo.* Optimum post tensioning cable forces of Mau-Lo Hsi cable-stayed bridges // Engineering Structures. 2006. Vol. 28. No. 10. Pp. 1407–1417.

RESEARCH PAPER

## The concept of development of computer aided design programs for bridges or other engineering structures according to the specified criterion of optimality

Pavel M. Salamakhin<sup>1\*</sup>, Anton D. Chasovnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

<sup>2</sup>Research Institute of Bridges and Hydraulic Engineering Structures, 2 Igarskii proezd, bldg. 1, Moscow, 129329, Russian Federation

\*pavel-salamahin@mail.ru

### Article history:

Received: July 08, 2019

Revised: October 01, 2019

Accepted: October 10, 2019

### Abstract

In article on the basis of generalization of experience of creating in the period from 1997 to 2015 computer-aided design of various bridge structures by fifteen graduate students of the Department of Bridges and Transport Tunnels MADI (GTU)

*For citation*

Salamakhin P.M., Chasovnikov A.D. (2019). The concept of development of computer aided design programs for bridges or other engineering structures according to the specified criterion of optimality. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 345–352. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-345-352>. (In Russ.)

under the leadership of Doctor of Technical Sciences, Professor P.M. Salamakhin the authors proposed the concept of the development of the structure of standard programs of computer-aided design of bridge or other engineering structures according to the given optimality criterion. Given in the most general form of the complete block diagram of such programs with the detailed disclosure of the indicator of simultaneous execution of a set of requirements in all elements of the structure dependent scale in the sequential approach the minimum possible values, and also demonstrates how to determine the combination of values of all independent parameters of structures that provide the design of facilities according to the given optimality criterion. When working on the article, some provisions of earlier studies and the state of development of automation of design of bridge structures abroad are taken into account. The authors proceed from the fact that the proposed concept of development of computer-aided design of bridge and other engineering structures according to the specified criterion of optimality can and should be used as a model in the development of computer-aided design of structures with various generalized design schemes.

**Keywords:** bridge and other engineering structures; generalized design schemes; dependent dimensions and their independent parameters; specified criteria of optimality of the structure; automated design; typical block diagram of design programs

### References

1. Liyanagama. Dzhana. (1990). *Razrabotka i obosnovanie rekomendacij po konstruktivnym resheniyam opor avtodorozhnyh mostov dlya uslovij Respubliki Shri-Lanka* [Development and justification of recommendations on structural solutions of road bridge supports for the conditions of the Republic of Sri Lanka] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)
2. Le Thu Hyong. (1999). *Optimizaciya parametrov proletryh stroenij visyachih mostov pri ih proektirovanii s primeneniem PK* [Optimization of parameters of span structures of suspension bridges in their design with the use of PC] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)
3. Novodzinskij A.L. (2001). *Sovershenstvovanie metodiki avtomatizirovannogo proektirovaniya ortotropnyh plit proezzhej chasti avtodorozhnyh mostov* [Improved methods of computer-aided design of orthotropic plates roadway of highway bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)
4. Auet Luis. (2002). *Obosnovanie konstruktivnyh form i sposobov stroitel'stva avtodorozhnyh mostov v usloviyah Respubliki Kongo* [Justification of structural forms and methods of construction of road bridges in the Republic of the Congo] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)
5. Fan Pin'. (2004). *Optimizaciya gibkosti szhatyh elementov mostovyh konstrukcij* [Optimization of flexibility of compressed elements of bridge structures] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)
6. Alizade Shahram Hoe. (2003). *Optimizaciya parametrov dvuhpilonyh metallicheskih vantovyh mostov pri ih avtomatizirovannom proektirovanii s primeneniem PK*

[Optimization of parameters of double-pylon metal cable-stayed bridges at their computer-aided design with the use of PC] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

7. Nguen Nam Ha. (2006). *Avtomatizaciya proektirovaniya i optimizaciya stalezhelezobetonnyh proletryh stroenij avtodorozhnyh mostov* [Design automation and optimization of steel-reinforced concrete spans of road bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

8. Nguen Thak Kuang. (2007). *Sovershenstvovanie programmy avtomatizirovannogo proektirovaniya dvuhpilonyh metallicheskih vantovyh mostov* [Improvement of the program of computer-aided design of double-pylon metal cable-stayed bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

9. Salamakhin P.M., Le Van Manh. (2010). The generalized constructive form of two-pylon cable-stayed composite bridges and the flow-chart of program of their design optimization. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], (2), 60–65. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10894>. (In Russ.)

10. Salamakhin P.M., Tran Thai Minh. (2010). The generalized constructive form of three-span steel suspension bridges and the flow chart of the program of their design optimization. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], (2), 65–71. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10895>. (In Russ.)

11. Nguen Man' Thyong. (2011). *Avtomatizirovannoe proektirovanie nerazreznnyh metallicheskih proletryh stroenij avtodorozhnyh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti* [Computer-aided design of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate of the roadway] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

12. Zyont The An'. (2011). *Avtomatizirovannoe proektirovanie razreznnyh zhelezobetonnyh proletryh stroenij s napryagaemoj armaturoj* [Computer-aided design of single-span reinforced concrete superstructures with ten-

**Pavel M. Salamakhin**, leading researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor, member of the Russian Academy of Transport. eLIBRARY SPIN-code: 2596-3649. SCOPUS iD: 6504210104.

**Anton D. Chasovnikov**, lead engineer of Bridge Inspection and Testing Department.

sioned reinforcement] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

13. Le Man' Han. (2011). *Avtomatizirovannoe proektirovanie razreznykh zhelezobetonnykh proletnykh stroenij s nenapryagaemoj armaturoj* [Computer-aided design of single-span reinforced concrete superstructures with non-stressed reinforcement] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

14. Zajyar Min' Shve. (2013). *Obosnovanie racional'nykh parametrov stalezhelezobetonnykh dvuhpilonnnykh vantovykh mostov s vantami po scheme "veer"* [Justification of rational parameters of steel-reinforced concrete double-pylon cable-stayed bridges with "fan" cables] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

15. Reshetnikov I.V. (2015). *Obosnovanie racional'nykh konstruktivno-tehnologicheskikh reshenij derevometallozhelezobetonnykh proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov* [Substantiation of rational constructive and technological solutions of wood-metal-concrete spans of road bridges] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). (In Russ.)

16. Nguen Man' Thyong. (2011). Optimizaciya parametrov nerazreznykh metallicheskih proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti [Optimization of parameters of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate of the roadway]. *Vestnik MADI*, 3(26), 87–90. (In Russ.)

17. Nguen Man' Thyong. (2011). Osnovy programmy avtomatizirovannogo proektirovaniya nerazreznykh metallicheskih proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti [Fundamentals of the software for of computer-aided design of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate of the roadway]. *Engineering Systems – 2011: Tezisy dokladov* (pp. 84–85). Moscow. (In Russ.)

18. Nguen Man' Thyong. (2010). Obobshchennaya konstruktivnaya forma nerazreznykh metallicheskih proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov s ortotropnoj plitoy proezzhej chasti i blok-skhemata programmy avtomatizacii ih proektirovaniya [Generalized structural form of continuous metal spans of road bridges with orthotropic plate projections of flowchart elements and design programs]. *Issledovaniya mostovykh i tonnel'nykh sooruzhenij: sb. nauch. tr.* (pp. 62–66). Moscow: MADI Publ. (In Russ.)

19. Thyong Nguen Man'. (2011). Optimizaciya parametrov korobchatykh metallicheskih proletnykh stroenij [Optimization of box-shaped metal span parameters]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli* [Science and Engineering for Highways], (3), 32–33. (In Russ.)

20. Salamakhin P.M. (2011). *Proektirovanie mostovykh i stroitel'nykh konstrukcij* [Design of bridges and building constructions] (pp. 343–357). Moscow: KnoRus Publ. (In Russ.)

21. Salamakhin P.M. (2003). Avtomatizirovannoe proektirovanie metallicheskih dvuhpilonnnykh vantovykh mostov [Automated designing two-pylon metal cable-stayed bridges]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], (10), 15–19 (In Russ.)

22. Salamakhin P.M. (2004). Problemy i koncepciya avtomatizacii proektirovaniya i optimizacii konstrukcii mostov [Problems and concept of automation of design and optimization of bridges]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], (4), 20–23. (In Russ.)

23. Salamakhin P.M. (1977). *Metod obobshcheniya zakonomernostej vesa nesushchih konstrukcij* [Method of generalization of weight regularities of load-bearing structures]. Moscow. (In Russ.)

24. Salamakhin P.M., Reshetnikov I.V. (2014). K vyboru racional'nykh konstruktivnykh form derevometallozhelezobetonnykh proletnykh stroenij avtodorozhnykh mostov [Choice of rational forms of road bridge woodsteelconcrete spans]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli* [Science and Engineering for Highways], (3), 45–48. (In Russ.)

25. Kleveko V.I., Moiseeva O.V., Novodzinskij A.L. (2017). Vybora optimal'nogo grunta zasypki podzemnogo peshekhodnogo perekhoda iz metallicheskih gofrirovannykh konstrukcij [Selecting an optimal backfilling for underground pedestrian crossings from corrugated metal structures]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin], 8(1), 102–114. (In Russ.)

26. Baldomir A., Hernandez S., Nieto F., Jurado J.A. (2010). Cable optimization of a long span cable stayed bridge in La Coruña (Spain). *Advances in Structural Optimization*, 41(7–8), 931–938. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997810000517>

27. Ashraf El Damatty, Olfat Sarhang Zadeh. (2012). *Comparison between three types of cable-stayed bridges using structural optimization*. University of Western Ontario, Canada.

28. Faella C., Martinell E., Nigro E. (2002). Steel and concrete composite beams with flexible shear connection: "exact" analytical expression of the stiffness matrix and application. *Computer & Struct.*, 80(11), 1001–1009. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00038-X

29. Reddy J.N. (1991). *An introduction to the finite element method*. McGraw Hill, International Edition.

30. Simes L.M.C., Negro J.H.J.O. (2000). Optimization of cable-stayed bridges with box-gridder decks. *Advances in Engineering Software*, 31(6), 417–423. DOI: 10.1016/0965-9978(00)00003-X

31. Manabu Ito, Yozo Fujino, Toshio Miyata, Nobuyuki Narita. (1991). *Cable-stayed bridges recent developments and their future*. Amsterdam – London – New York – Tokyo.

32. Podolny W., Scalzi J.B. (1986). *Construction and design of cable-stayed bridges*. New York.

33. Tao Zhang, Zhi Min Wu. (2011). Dead load analysis of cable stayed bridges. *International Conference on Intelligent Building and Management*, 270–274.

34. Yu Chi Sung, Dyi Wei Chang, Eng Huat Teo. (2006). Optimum post tensioning cable forces of Mau-Lo Hsi cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 28(10), 1407–1417.

ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ  
THEORY OF PLASTICITYDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359  
УДК 672.32

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование предельных деформаций листовой вытяжки  
с учетом пластического утонения и разрушения материала

Ю.А. Морозов

МИРЭА – Российский технологический университет, Российская Федерация, 107996, Москва, ул. Стромьинка, 20  
akafest@mail.ru

## История статьи:

Поступила в редакцию: 15 мая 2019 г.  
Доработана: 28 августа 2019 г.  
Принята к публикации: 15 сентября 2019 г.

## Аннотация

**Цель.** В работе производится анализ процесса листовой вытяжки и разрабатывается методика определения минимальной кривизны торового скругления при формообразовании цилиндрического изделия (стакана) с учетом пластического утонения деформируемого материала торцевой кромкой давящего пуансона. **Методы.** Проанализирована существующая схема формоизменения с использованием допустимых коэффициентов вытяжки и предела прочности материала, представляющих основу деформационно-силового расчета, который зачастую игнорирует фактор деформационного утонения и его влияние на прочность материала, что в совокупности может привести к превышению допускаемых напряжений в материале, обуславливающему его разрыв. Разрабатывается математическая модель объемного напряженного состояния металла, позволяющая оценить величину утонения при формообразовании торовой поверхности различной кривизны с последующей аппроксимацией найденных величин полиномиальной функцией. Рассматривая критерием предельных нагрузок уровень радиальных напряжений при сворачивании и растягивании листового материала с учетом его утонения, устанавливается минимальная кривизна скругления торовой поверхности стакана. **Выводы.** Полученные результаты позволят смоделировать напряженно-деформированное состояние металла при разработке технологии листовой вытяжки: установить величину утонения и оценить уровень радиальных напряжений при формообразовании скругления торовой поверхности для предупреждения разрушения вытягиваемого стакана (отрыв доньшка), что гарантирует получение качественной продукции.

**Ключевые слова:** вытяжка; нейтральное сечение; утонение; радиус кривизны; интенсивность деформации

## Для цитирования

Морозов Ю.А. Исследование предельных деформаций листовой вытяжки с учетом пластического утонения и разрушения материала // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 353–359. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>

## Введение

При разработке технологического процесса листовой штамповки, в частности – вытяжки, пожалуй, основным критерием реализуемости процес-

са являются общеизвестные коэффициенты вытяжки, устанавливающие соотношение диаметров сворачиваемого пространственного изделия (полуфабриката) и плоской заготовки (рис. 1)

$$d_1 = D_3 m_1; \quad d_2 = d_1 m_2 \text{ и т.д.,}$$

где  $d_1, d_2$  – диаметр вытягиваемого изделия;  $D_3$  – диаметр заготовки;  $m_1, m_2$  – коэффициенты вытяжки, устанавливающие возможность деформирования металла и ограничиваемые его разрушением [1–3].

Морозов Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в машино- и приборостроении. eLIBRARY SPIN-код: 3189-5426. ORCID iD: 0000-0001-9229-7398. Author ID: 24475032700.

© Морозов Ю.А., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

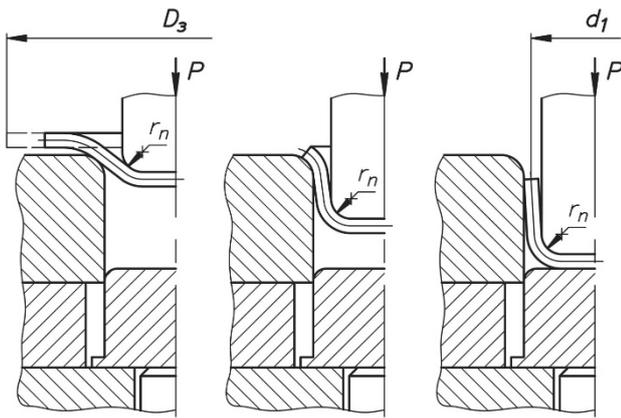


Рис. 1. Схема вытяжки  
[Figure 1. Schematic drawing]

Установленный таким образом диаметр полуфабриката, характеризующий площадью поперечного сечения  $F$  кольцевого элемента в виде развертки полого изделия, будет определять максимальную силу деформирования (вытяжки) с учетом предела прочности материала  $\sigma_s$ .

$$P = F \sigma_s.$$

Выражая площадь кольцевого элемента через его периметр  $L$  и толщину стенки  $S$  или приравняв периметр полого изделия к длине окружности цилиндрического изделия  $L = \pi d$ , нетрудно получить искомое выражение для конкретной конфигурации детали:

$$F = L S = \pi d S. \quad (1)$$

На этом, в общем, и заканчивается деформационно-силовой расчет, который зачастую игнорирует фактор деформационного утонения стенки изделия и его влияние на прочность материала, в пользу отдельного исследования, практически несвязанного с вышеизложенными силовыми параметрами формообразования. Хотя общепризнанным является тот факт, что вытяжка со значительными деформациями создает высокую вероятность разрыва металла в более опасном сечении – на торовой поверхности, образованной торцевым радиусом скругления давящего пуансона и представляющей участок наиболее прогрессирующего утонения при переходе от стенок стакана к доньшку.

При этом некорректно рассматривать только одно утонение, уменьшающее поперечное сечение листовой заготовки, так как сопутствующие здесь деформационные процессы формоизменения параллельно приводят к упрочнению материала, то есть к повышению его несущей способности.

Таким образом, здесь важны два фактора – геометрическое утонение и физическое упрочнение материала, причем их совокупное влияние происходит не по диаметру полуфабриката, а в области торцевого радиуса пуансона, характеризующего меньшими периметром и площадью поперечного сечения, создающими вероятность более скорого разрыва материала в сравнении с классическим методом расчета.

### 1. Математическая постановка задачи

Объемное напряженное состояние металла при формообразовании торовой поверхности определяется перпендикулярно направленными радиальными напряжениями  $\sigma_r$ , относительно изгибаемой заготовки; в результате давления слоев металла друг на друга по контуру изделия действуют окружные тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$ ; вдоль образующей изделия действуют продольные напряжения  $\sigma_l$  (рис. 2).

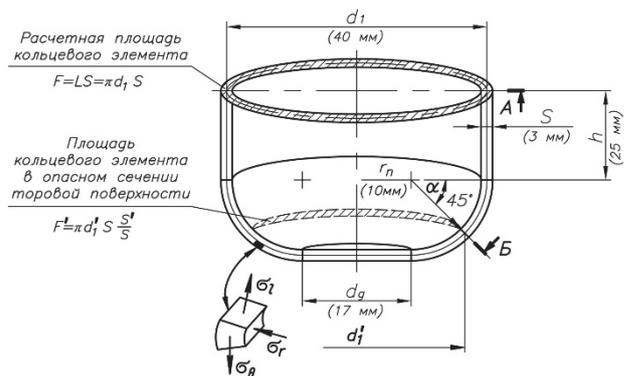


Рис. 2. Распределение напряжений в металле при вытяжке  
[Figure 2. The stress distribution in the metal under the hood]

Совокупность напряжений, вызывающих искривление слоев металла, направлена на возникновение равнозначного деформированного состояния металла в очаге деформации. Согласно условию постоянства объема, взаимосвязь продольных, радиальных и тангенциальных деформаций описывается зависимостью [4]

$$(1 + \varepsilon_l)(1 + \varepsilon_r)(1 + \varepsilon_\theta) = 1.$$

При допущении равенства тангенциальных и продольных деформаций  $\varepsilon_\theta = \varepsilon_l$  устанавливается зависимость для радиальной деформации

$$\varepsilon_r = \frac{1}{(1 + \varepsilon_l)(1 + \varepsilon_\theta)} - 1 = \frac{1}{(1 + \varepsilon_\theta)^2} - 1.$$

Тангенциальная деформация, возникающая при изгибе полосы, обуславливает деформационное изменение наружного и внутреннего радиусов, что приводит к изменению толщины растянутых и сжатых слоев материала, разделяемых радиусом нейтральной поверхности  $\rho_n$  (рис. 3):

$$\varepsilon_{\theta \text{ нар}} = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - 1 \text{ и } \varepsilon_{\theta \text{ вн}} = \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} - 1. \quad (2)$$

Изменение наружного и внутреннего радиусов выражается через первоначальные радиусы

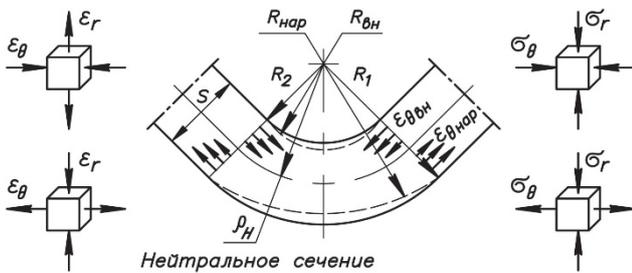
$$\left. \begin{aligned} R_{\text{нар}} &= R_1 + (R_1 - \rho_n) \varepsilon_{r \text{ нар}}, \\ R_{\text{вн}} &= R_2 + (\rho_n - R_2) \varepsilon_{r \text{ вн}}. \end{aligned} \right\}$$

Наружный радиус  $R_1$  под действием радиальной деформации уменьшается, принимая новое условное значение  $R_{\text{нар}}$ :

$$\varepsilon_{r \text{ нар}} = \frac{R_{\text{нар}} - R_1}{R_1 - \rho_n} < 0.$$

Внутренний радиус  $R_2$  увеличивается до  $R_{\text{вн}}$  под действием соответствующей радиальной деформации:

$$\varepsilon_{r \text{ вн}} = \frac{R_{\text{вн}} - R_2}{\rho_n - R_2} > 0.$$



**Рис. 3.** Распределение тангенциальных деформаций по сечению полосы  
**[Figure 3.** Distribution of tangential strain on the cross section of the strip]

Приравнивая тангенциальные и радиальные деформации  $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_r$ , устанавливаются выражения для определения наружного и внутреннего радиусов изогнутого элемента [5]:

$$\left( \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} \right)^2 \left( \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - 1 \right) = \frac{R_1}{R_2} Z - 1; \quad (3a)$$

$$\frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \left( \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} + 1 - 2Z \right) \left( 2 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} \right) = 1 - Z, \quad (36)$$

где  $Z = R_2/\rho_n$  – коэффициент, определяющий радиус нейтральной поверхности, вычисляемый из условия равновесия изгибающих моментов в растянутых и сжатых слоях заготовки, возникающих под влиянием тангенциальных напряжений относительно нейтральной поверхности:

$$M_{\text{нар}} = M_{\text{вн}}.$$

## 2. Анализ результатов исследования

Иллюстративным примером можно рассмотреть вытяжку цилиндрического стакана  $\varnothing 40 \times 3$  мм ( $S = 3,0$  мм), имеющего высоту цилиндрической части  $h = 25$  мм. Формообразование торового радиуса скругления осуществляется торцевым радиусом давящего пуансона  $r_n = R_2 = 10$  мм.

Расчет, выполненный по средним размерам изделия, определяет диаметр заготовки [6]:

$$\begin{aligned} D_3 &= \sqrt{4d_1 h + 8 \left( r_n + \frac{S}{2} \right)^2 + 2\pi \left( r_n + \frac{S}{2} \right) d_d + d_d^2} = \\ &= \sqrt{4 \cdot 40 \cdot 25 + 8 \left( 10 + \frac{3,0}{2} \right)^2 + 2\pi \left( 10 + \frac{3,0}{2} \right) 17 + 17^2} = \\ &= 74,9 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где  $d_d$  – диаметр доньшка стакана.

$$d_d = d_1 - 2r_n - S = 40 - 2 \cdot 10 - 3 = 17 \text{ мм}.$$

В результате коэффициент вытяжки  $m_1 = d_1/D_3 = 40/74,9 = 0,534 < [m_1]$ .

Допускаемый коэффициент вытяжки мягких сталей для первой операции составляет  $[m_1] = 0,56 \dots 0,58$ , что позволяет получение обозначенного стакана уже на первом переходе.

Площадь кольцевого элемента в сечении  $\Delta$ , образованного торцевой кромкой окружности стакана (1):

$$F = \pi d_1 S = \pi 40 \cdot 3,0 = 377 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, установленные «формальные» параметры вытяжки дают представление только о возможности сворачивания листовой заготовки в пространственное изделие и наибольших силовых параметрах процесса для последующего выбора технологического оборудования. При этом вероятность отрыва доньшка имеет по большей части

эмпирическую составляющую, не отражаемую общепринятой методикой расчета.

В связи с этим далее на текущем примере продолжаем развивать теорию пластического изгиба (вытяжки) и связанное с этим деформационное изменение толщины листовой заготовки, определяемое отношением радиусов кривизны:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_2 + S}{R_2} = \frac{10 + 3,0}{10} = 1,3.$$

Итерационным перебором при соблюдении обоюдного равенства выражений (3) определяется коэффициент  $Z = 0,8777$ , позволяющий оценить величину деформированных радиусов:

$$\frac{R_{нар}}{\rho_n} = 1,1137 \quad \text{и} \quad \frac{R_{вн}}{\rho_n} = 0,8795.$$

Значения относительных изгибающих моментов

$$\begin{aligned} \bar{M}_{нар} &= \left( \frac{R_{нар}}{\rho_n} - 1 \right)^2 \left( \frac{R_{нар}}{\rho_n} + 1 \right) = \\ &= (1,1137 - 1)^2 (1,1137 + 1) = 0,0273253; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_{вн} &= \left( 1 - \frac{R_{вн}}{\rho_n} \right)^2 \left( 1 + \frac{R_{вн}}{\rho_n} \right) = \\ &= (1 - 0,8795)^2 (1 + 0,8795) = 0,0272908. \end{aligned}$$

С различием менее 1 % расчет можно считать окончанным. В противном случае значительное расхождение в величинах изгибающих моментов вынуждает скорректировать положение нейтральной поверхности.

В результате радиус нейтральной поверхности

$$\rho_n = R_2 / Z = 10 / 0,8777 = 11,39 \text{ мм.}$$

Наружный радиус торового скругления и протяженность растянутой зоны

$$R_{нар} = \frac{R_{нар}}{\rho_n} \rho_n = 1,1137 \cdot 11,39 = 12,69 \text{ мм;}$$

$$S_{раст} = R_{нар} - \rho_n = 12,69 - 11,39 = 1,3 \text{ мм.}$$

Следует отметить, что формообразование при вытяжке будет происходить по фиксированному внутреннему радиусу  $R_{вн} / \rho_n = \text{const}$ , обусловленному торцевым радиусом скругления давящего пуансона  $r_n = R_2 = R_{вн} = 10 \text{ мм}$ . В этом случае протяженность сжатой зоны

$$S_{сж} = \rho_n - r_n = 11,39 - 10 = 1,39 \text{ мм.}$$

В результате толщина торовой поверхности после деформирования и коэффициент утонения

$$S' = S_{раст} + S_{сж} = 1,3 + 1,39 = 2,69 \text{ мм;}$$

$$S' / S = 2,69 / 3,0 = 0,897.$$

Использование относительных величин позволяет получить более компактную зависимость, упрощающую приведенную выше структуру вычислений и, соответственно, повышающую точность расчетов за счет исключения промежуточных вычислений:

$$\begin{aligned} \frac{S'}{S} &= \frac{1}{Z(R_1/R_2 - 1,0)} \left( \frac{R_{нар}}{\rho_n} - \frac{r_n}{\rho_n} \right) = \\ &= \frac{1}{0,8777(1,3 - 1,0)} \left( 1,1137 - \frac{10}{11,39} \right) = 0,895. \end{aligned}$$

В табл. 1 приведены расчеты кинематических параметров процесса вытяжки для других отношений наружного и внутреннего радиусов торовой поверхности.

Таблица 1

Кинематические параметры вытяжки  
[Table 1. Kinematic parameters of the hood]

$R_1/R_2$	$Z = R_2/\rho_n$	$R_{нар}/\rho_n$	$R_{вн}/\rho_n$	$S'/S$
1,01	0,9950	1,0049	0,9950	0,992
1,05	0,9760	1,0237	0,9760	0,985
1,10	0,9538	1,0450	0,9539	0,952
1,20	0,9136	1,0822	0,9142	0,925
1,50	0,8150	1,1642	0,8211	0,857
1,75	0,7485	1,2112	0,7634	0,824
2,00	0,6915	1,2465	0,7181	0,803
2,25	0,6417	1,2736	0,6820	0,788
2,50	0,5976	1,2947	0,6528	0,778
2,75	0,5585	1,3115	0,6290	0,771
3,00	0,5235	1,3250	0,6093	0,765

Графическая интерпретация табличных значений в виде криволинейной зависимости представлена на рис. 4.

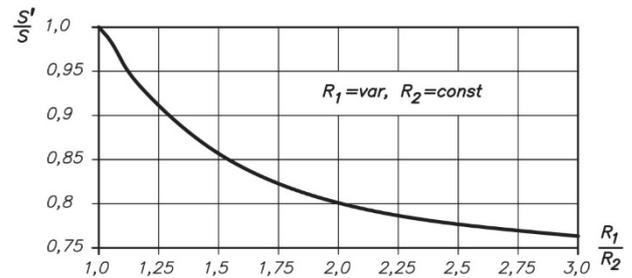


Рис. 4. Утонение листового металла при вытяжке  
[Figure 4. The thinning of sheet metal in the hood]

Лучшее аппроксимирование приведенной зависимости с погрешностью не более 2 % в обозначенном интервале кривизны обеспечивается полиномиальной математической моделью третьего порядка

$$\frac{S'}{S} = -0,05 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^3 + 0,38 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 - 0,985 \frac{R_1}{R_2} + 1,65.$$

При допущении наиболее прогрессирующего утонения, геометрически расположенного под углом  $\alpha = 45^\circ$  относительно образующего радиуса кривизны торовой поверхности скругления, определяется диаметр и площадь опасного сечения  $\underline{B}$  (рис. 2):

$$d'_1 = d_1 - 2(1 - \cos \alpha)r_n \approx \approx d_1 - 0,586r_n = 40 - 0,586 \cdot 11,39 = 33,3 \text{ мм};$$

$$F' = \pi d'_1 S \frac{S'}{S} = \pi 33,3 \cdot 3 \cdot 0 \cdot 0,895 = 280,9 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, сужение площади кольцевого элемента в опасном сечении торовой поверхности в совокупности с прогрессирующим деформационным утонением составило

$$F'/F = 280,9/377 = 0,745,$$

что будет вызывать увеличение растягивающих напряжений в стенке стакана, обусловленных усилием вытяжки, пока они не превысят допускаемых напряжений в материале, провоцирующих его разрыв [7; 8].

Однако ввиду отсутствия точных методик определения усилия вытяжки критерием предельных нагрузок при деформировании будем рассматривать уровень радиальных напряжений при сворачивании и растягивании листового материала по торцевой кромке пуансона [6]:

$$\sigma_{\rho \max} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} S e^{f \frac{\pi}{2}}$$

с учетом утонения  $\sigma_{\rho \max} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} \frac{S}{S'/S} e^{f \frac{\pi}{2}},$

где  $f$  – коэффициент контактного трения.

Принимая во внимание равенство

$$e^{f \frac{\pi}{2}} = 1 + 1,6 f,$$

получаем

$$\sigma_{\rho \max} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} \frac{S}{S'/S} (1 + 1,6 f), \quad (4)$$

где  $\sigma_T$  – сопротивление пластической деформации:

$$\sigma_T = \sigma_{0,2} + A \varepsilon_i^n; \quad (5)$$

$A, n$  – коэффициенты упрочнения данного материала;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций, характеризующая упрочнение материала и определяемая суммарным значением тангенциальных деформаций на наружной и внутренней поверхностях сворачиваемой торовой поверхности стакана [9]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\theta \text{нар}} + \varepsilon_{\theta \text{вн}}.$$

С использованием зависимостей для тангенциальных деформаций (2) данное выражение можно преобразовать к более простому виду:

$$\varepsilon_i = \frac{R_{\text{нар}}}{\rho_n} - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_n} = 1,1137 - 0,8795 = 0,234 \text{ (23,4 \%)}.$$

Принимая модельным материалом сталь ВСтЗсп, имеющую средний предел прочности  $\sigma_B = 425$  МПа, рассчитываются коэффициенты упрочнения (табл. 2) [10]:

$$n = \frac{\sigma_B \delta}{\sigma_B - \sigma_{0,2}} = \frac{425 \cdot 0,26}{425 - 245} \approx 0,6;$$

$$A = \frac{\sigma_B - \sigma_{0,2}}{\delta^n} = \frac{425 - 245}{26^{0,6}} = 25,5.$$

Таблица 2

Механические свойства стали ВСтЗсп (ГОСТ 380-94) [Table 2. Mechanical properties of steel VSt3sp (GOST 380-94)]

Состояние поставки [Delivery condition]	Толщина, мм [Thickness, mm]	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа [Conditional yield strength $\sigma_{0,2}$ , MPa]	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа [Tensile strength $\sigma_B$ , MPa]	$\delta$ , %
Не менее [Nevertheless]				
Прокат горячекатаный [Hot rolled]	До 20	245	370...480	26

В результате сопротивление пластической деформации (5)

$$\sigma_T = \sigma_{0,2} + A \varepsilon_i^n = 245 + 25,5 \cdot 23,4^{0,6} = 414,1 \text{ МПа}.$$

С использованием коэффициента трения  $f = 0,2$  [11] устанавливается радиальное напряжение в материале при формообразовании скругления торовой поверхности стакана (4):

$$\sigma_{\rho_{\max}} = \frac{\sigma_T}{2\rho_n} \frac{S}{S'/S} (1+1,6f) =$$

$$= \frac{414,1}{2 \cdot 11,39} \frac{3,0}{0,895} (1+1,6 \cdot 0,2) = 80,4 \text{ МПа.}$$

Деформационно-силовые параметры сворачивания торовой поверхности при других значениях кривизны приведены в табл. 3.

Таблица 3

Деформационно-силовые параметры вытяжки  
[Table 3. Deformation-force parameters of the hood]

$R_1/R_2$	Интенсивность деформаций, $\epsilon_i$ [Strain intensity, $\epsilon_i$ ]	Сопrotивление пластической деформации $\sigma_T$ , МПа [The resistance to plastic deformation $\sigma_T$ , МПа]	Радиальное напряжение при сворачивании торовой поверхности $\sigma_{\rho_{\max}}$ , МПа [Radial stress at torus surface folding $\sigma_{\rho_{\max}}$ , МПа]
1,01	0,010	270,5	1,800
1,05	0,048	310,4	10,10
1,10	0,091	340,9	22,60
1,20	0,168	383,6	50,00
1,50	0,343	457,7	143,6
1,75	0,448	494,6	222,4
2,00	0,528	520,5	295,9
2,25	0,592	540,1	362,9
2,50	0,642	554,8	422,0
2,75	0,682	566,2	473,6
3,00	0,716	575,7	520,1

### Заключение

Анализ табличных результатов устанавливает значительный уровень радиальных напряжений на торовой поверхности вытягиваемого стакана, приближающихся к начальному пределу текучести при  $R_1/R_2 > 1,75$ .

Максимальная кривизна доньшка стакана, которую теоретически можно выполнить,  $R_1/R_2 \leq 2,5$ , так как при этом в заготовке возникают напряжения, сравнимые с пределом прочности данного модельного материала.

Таким образом, доказаны условия разрушения вытягиваемого стакана (отрыв доньшка) при уменьшении кривизны скругления его торовой поверхности и прогрессирующего утонения ввиду возникновения значительных растягивающих напря-

жений, превышающих начальный предел текучести материала.

### Список литературы

1. Devendar G., Chennakesava Reddy A. Study on Deep Drawing Process Parameters – A Review // International Journal of Scientific & Engineering Research. June 2016. Vol. 7. Issue 6. Pp. 149–155.
2. Reddy A.C.S., Rajesham S., Reddy P.R., Kumar T.P., Goverdhan J. An experimental study on effect of process parameters in deep drawing using Taguchi technique // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2015. Vol. 7. No. 1. Pp. 21–32.
3. Ishimaru E., Takahashi A., Ono N. Effect of material properties and forming conditions on formability of high-purity ferritic stainless steel // Nippon Steel Technical Report No. 99. September 2010. Pp. 26–32.
4. Кохан Л.С., Лебедев Н.Н., Морозов Ю.А., Мочалов Н.А. Проектирование калибров сортовых станов и операций листовой штамповки. М.: МГВМИ, 2007. 340 с.
5. Кохан Л.С., Морозов Ю.А., Шульгин А.В. Изменение толщины стенок цилиндрических стаканов при вытяжке без прижима // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 5. С. 9–13.
6. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
7. Bruschi S., Altan T., Banabic D., Bariani P.F., Brosius A., Cao J., Ghiotti A., Khraisheh M., Merklein M., Tekkaya A.E. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2014. Vol. 63. Issue 2. Pp. 727–749.
8. Wiebenga J.H., Atzema E.H., An Y.G., Vegter H., van den Boogaard A.H. Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming // Journal of Materials Processing Technology. February 2014. Vol. 214. Issue 2. Pp. 238–252.
9. Верхов Е.Ю., Морозов Ю.А. Анализ и разработка технологии изготовления гнутых толстолистовых деталей // Вестник московского государственного открытого университета. Серия: Техника и технология. 2011. № 4 (6). С. 14–19.
10. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
11. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.

## The study of marginal deformations of the leaf extracts with regard to plastic thinning and destruction of the material

Yury A. Morozov

MIREA – Russian Technological University, 20 Stromynka St., Moscow, 107996, Russian Federation  
akafest@mail.ru

### Article history:

Received: May 15, 2019  
Revised: August 28, 2019  
Accepted: September 15, 2019

### Abstract

**The aim of work.** The paper analyzes the process of sheet drawing and develops a method for determining the minimum curvature of the torus fillet in the formation of a cylindrical product (glass), taking into account the plastic thinning of the deformable material by the end edge of the pressing punch. **Methods.** The existing scheme of forming with the use of permissible coefficients of drawing and tensile strength of the material, representing the basis of deformation-force calculation, which often ignores the factor of deformation thinning and its impact on the strength of the material, which together can lead to excess of the allowable stress in the material, causing its rupture, is analyzed. A mathematical model of the volume stress state of the metal is developed, which allows to estimate the value of the thinning in the formation of the torus surface of different curvature, followed by the approximation of the values found by a polynomial function. Considering the criterion of limit loads the level of radial stresses during folding and stretching of the sheet material, taking into account its thinning, the minimum curvature of the torus surface of the glass is established. **Results.** The results obtained will allow to simulate the stress-strain state of the metal in the development of sheet drawing technology: to establish the value of thinning and to estimate the level of radial stresses in the formation of the torus surface rounding to prevent the destruction of the elongated glass (separation of the bottom), which guarantees quality products.

**Keywords:** hood; neutral section; thinning; radius of curvature; strain rate

### For citation

Morozov Yu.A. (2019). The study of marginal deformations of the leaf extracts with regard to plastic thinning and destruction of the material. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 353–359. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-353-359>. (In Russ.)

### References

1. Devendar G., Chennakesava Reddy A. (2016). Study on Deep Drawing Process Parameters – A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(6), 149–155.
2. Reddy A.C.S., Rajesham S., Reddy P.R., Kumar T.P., Goverdhan J. (2015). An experimental study on effect of process parameters in deep drawing using Taguchi technique. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 7(1), 21–32.
3. Ishimaru E., Takahashi A., Ono N. (2010). Effect of material properties and forming conditions on formability of high-purity ferritic stainless steel. *Nippon Steel Technical Report No. 99*, 26–32.
4. Kokhan L.S., Lebedev N.N., Morozov Yu.A., Mochalov N.A. (2007). *Proektirovanie kalibrov sortovykh stanov i operatsiy listovoy shtampovki [Designing gauges section mills and stamping operations]*. Moscow: MGVM Publ. (In Russ.).
5. Kokhan L.S., Morozov Yu.A., Shul'gin A.V. (2014). The change in the thickness of walls of cylindrical glasses at the extract without clip. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (5), 9–13. (In Russ.)
6. Popov E.A. (1977). *Osnovy teorii listovoj shtampovki [Fundamentals of sheet metal forming theory]*. Moscow: Mashinostroenie Publ. (In Russ.)
7. Bruschi S., Altan T., Banabic D., Bariani P.F., Brosius A., Cao J., Ghiotti A., Khraisheh M., Merklein M., Tekkaya A.E. (2014). Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63(2), 727–749.
8. Wiebenga, J.H., Atzema, E.H., An Y.G., Vegter, H., van den Boogaard, A.H. (2014). Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2), 238–252.
9. Verhov E.Yu., Morozov Yu.A. (2011). Analysis and development of manufacturing technology of bent plate parts. *Bulletin of the Moscow State Open University. Series: Technique and Technology*, 4(6), 14–19. (In Russ.)
10. Tomlenov A.D. (1972) *Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov [Theory of plastic deformation of metals]*. Moscow: Metallurgiya Publ. (In Russ.)
11. Isachenkov E.I. (1978). *Kontaktное trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem [Contact friction and lubricants in metal forming]*. Moscow: Mashinostroenie Publ. (In Russ.)

**Yury A. Morozov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Information Technologies in Machine- and Instrument Engineering. eLIBRARY SPIN-code: 3189-5426. ORCID iD: 0000-0001-9229-7398. Author ID: 24475032700.

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-360-366  
UDC 691.3

REVIEW PAPER

## Comprehensive view on the ductility of basalt fiber reinforced concrete focus on lightweight expanded clay

Vera V. Galishnikova<sup>1</sup>, Paschal C. Chiadighikaobi<sup>1\*</sup>, Dafe A. Emiri<sup>2</sup><sup>1</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation<sup>2</sup>Cross River University of Technology, PMB 1123, Calabar, Federal Republic of Nigeria

\*passydking2@mail.ru

### Article history:

Received: May 14, 2019

Revised: October 10, 2019

Accepted: October 13, 2019

### For citation

Galishnikova V.V., Chiadighikaobi P.C., Emiri D.A. (2019). Comprehensive view on the ductility of basalt fiber reinforced concrete focus on lightweight expanded clay. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 360–366. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-360-366>

### Abstract

**Relevance.** Ductility of basalt fiber reinforced concrete is an interesting property of basalt fiber reinforced concrete. However, very few experiments on this property is documented. **The aim of the work.** This paper provides a summarized analysis and review of existing publications on the ductility of lightweight basalt fiber reinforced concrete. **Methods.** This paper provides a comprehensive study on ductility of basalt reinforced concrete and lays the framework for proper laboratory experiment on the ductility of basalt fiber reinforced concrete. **Results.** From the findings of this review paper, ductility of dispersed basalt fiber reinforced concrete depends not only in the percentage of basalt fiber in the concrete but in the length and diameter of the basalt fiber. Increase in the percentage of basalt fiber in the concrete yielded an increase in the concrete ductility.

**Keywords:** reinforcement; ductility of lightweight basalt fiber concrete; expanded clay

## Introduction

### General overview

Basalt fibers are made from basalt rocks which are the most common rock type in the earth's crust. The basalt fibers are manufactured from melted rock which are then extruded through small nozzles to produce continuous basalt fiber. Basalt fiber are produced in various forms which are used for concrete reinforcement. The varieties mostly used as concrete reinforcement are: basalt rebar, basalt grids (mesh), chopped basalt fiber [1–3]. Comparing the physico-chemical properties of basalt rocks [4], basalt fibers which are derived from natural rocks are superior to traditional

thermal insulation/heat-resistant substances, such as ordinary fiberglass and asbestos. Similarly, basalt fiber has better operational properties, in terms of environmental friendliness of production [5].

Ductility can be defined as the measure of a material's ability to plastically deform without fracturing when placed under a tensile stress that exceeds its yield strength. Ductility highly depends on a material's chemical composition, a material's crystalline structure, and the temperature at which the ductility is being measured.

The term ductility in seismic design can be understood as the ability of a structure to undergo large amplitude cyclic deformations in elastic range without substantial reduction in strength. Ductile structures are noteworthy of being able to dissipate significant amount of energy during those cyclic deformations. Therefore, to understand the effectiveness of basalt fibres under cyclic loading in beam-column joint, determination of ductility is crucial [6].

Ductility can also be express in formula using the load-deflection or moment-curvature diagrams.

Vera V. Galishnikova, Professor, Director of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering.

Paschal Chimeremeze Chiadighikaobi, postgraduate PhD student of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering.

Dafe Aniekan Emiri, Lecturer in the Department of Civil Engineering.

© Galishnikova V.V., Chiadighikaobi P.C., Emiri D.A., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

For reinforced concrete sections, ductility can be expressed in the form of curvature ductility  $\mu_\phi$  [3]:

$$7\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y},$$

where  $\phi_u$  – the curvature at ultimate when the concrete strain reaches a specified limiting value;  $\phi_y$  – the curvature when the tension reinforcement first reaches the yield strength.

These are illustrated in figure 1. Curvature can generally be determined by the expression

$$\phi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{h},$$

where  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_2$  are the strains at top and bottom of a section of height  $h$ .

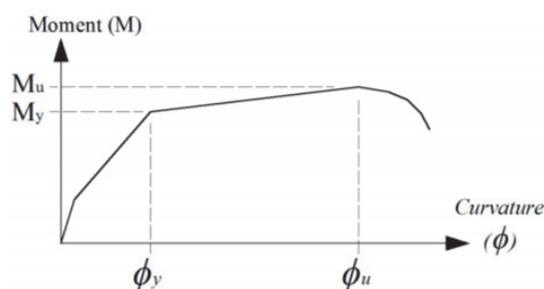


Figure 1. Definition of ductility [7]

Concrete structures are usually reinforced because plain concrete has strong limitations to resist tension. One of the foremost reinforcing materials is steel; it suits well as reinforcement but has well known pros and cons. Fiber reinforced polymers (FRP) have over the past years became an interesting alternative as a reinforcement for concrete [8]. Concrete is one of the most widely used construction material. Concrete has several advantages some of which are durability, formability and desired mechanical strength which gives concrete an edge over the other conventional building material but it has few disadvantages such as low tensile strength and strain capacity [9–12].

### Literature review

*Ablesimov N.E. and Malova Yu.G., 2016.* In the article [13], the authors summarized research data on the basalt rock fibres and wool, and composites reinforced. In their research, the authors covered some areas where refined basalt rock materials are used. These areas mentioned are in the field of chemical, automotive and economic sciences.

*Roy B. and Laskar A.I., 2017.* In the authors' experimental investigation, the yield displacement was determined based on the theory of reduced stiffness equivalent elasto-plastic yield [14]. The reduced stiffness

was calculated as secant stiffness at 75% of design load [15]. The post-peak displacement when the load-carrying capacity underwent 20% reduction was considered as the ultimate displacement [14]. Figure 2 shows the ductility of all the test basalt fibers. Ductility of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) specimens having 1 and 2% fibers were found to be decreased by 19 and 38% than the corresponding steel fiber reinforced concrete (SFRC) specimens. It is noteworthy that the ultimate displacement of both types of specimens at respective fiber percentages was found to be same, but specimens containing basalt fibers had higher yield displacement compared to specimens containing steel fibers (SF1 & SF2). This in turn reduced the ductility of BFRC specimens.

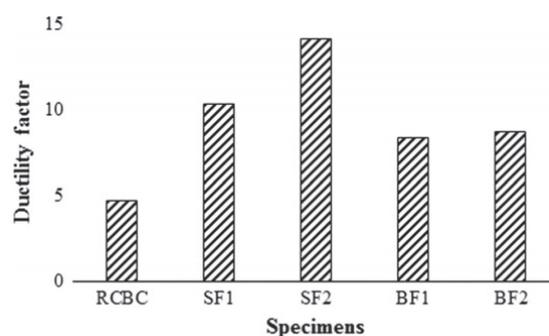


Figure 2. Ductility factor of test specimen

*A.E.A. Elshekh et al., 2014.* In the research paper evaluation, the effectiveness of chopped basalt fiber on the properties of high strength concrete [16], the authors stated that high amount of steel reinforcement content, durability and ductility issues have led the development of alternative types for reinforcement of high strength concrete (HSC) [17]. Fiber reinforcement (FR) of concrete has been investigated as strengthening materials with different techniques such as external and bar reinforcement. This is due to high contributions of the FR on the mechanical properties of HSC such as high compressive strength, toughness and ductility. Their main objective is to investigate the effect of chopped basalt fiber stands (CBFS) on the fresh and harden properties of HSC as a new internal strengthening material. The experimental results showed that the workability of HSC was affected negatively with increase of CBFS content. It is also shown that the early and long terms of compressive strength was not supported using the CBFS. Whereas, split and flexural tensile strengths were significantly improve. From the analysis it was also observed that the brittleness was significantly decreased and its toughness and ductility were steadily improved. Therefore, it can be concluded that the CBFS is a suitable strengthening material to pro-

duce ductile HSC. The toughness and ductility of the chopped basalt fiber stands (CBFS) concrete cubes were observed through the test in stress-strain relationship curves for all specimens. Furthermore, due to improvement of tensile and flexural strength, the toughness and ductility of HSC was enhanced.

*Ludovico et al., 2010.* In the authors' paper [18] *Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement*, the authors used basalt fiber laminates for confinement of concrete cylinders. The result of their experiment showed a better performance of basalt fiber over glass fiber-reinforced polymer in terms of compressive strength and ductility.

*High et al., 2015; Kizilkanat et al., 2015; Lipator et al., 2015; Hannawi et al., 2016.* The authors [19] in their research studied the use of basalt fibers as additive in concrete and they went further to observe that there was a significant increase in flexural strength and slight improvement in compressive strength. Similar studies were also carried out by [20–22], where it was found that the addition of basalt fiber in concrete improved ductility, elastic modulus, flexural strength, splitting tensile strength and fracture energy.

Lightweight concrete is assumed not to be considered as a special material lately because it is now been included in many codes of practice, such as the American Concrete Institute (ACI) [23]. In contrast with regular concrete lightweight concrete has lower density and increased deformability. The material properties and mechanics of lightweight concrete have long been identified and still continue to attract interest as shown in [24–26]. Many structural and bridge applications have been reported by authors such as authors of [27; 28]. High strength has also been achieved by [29; 30].

*Abdelhamid et al., 2014.* In the authors' paper [31], they presented analytical and experimental results on ductility of reinforced lightweight concrete beams and columns in the form of moment curvature relationships, and compared the response with that of normal reinforced concrete members. From the experimental part of their research, it is limited to flexural tests on beams made of lightweight concrete. The latter is obtained with natural lightweight aggregates. Further in the research, lightweight concrete beams and columns showed a more ductile behavior than normal concrete members and the analytical model reproduced the response with very good accuracy. The analysis shows the lightweight ductility was more pronounced in columns subjected to axial compression forces and bending.

*Buchkin A.V., 2011.* The author in the project work [32] explained that the construction of modern buildings and structures requires the use of concrete

with high performance properties, such as compressive and tensile strength, crack resistance, impact strength, wear resistance, corrosion resistance, frost resistance, etc. To achieve these, the transition to new types of concrete was facilitated by advances in the plasticization of concrete and mortar mixtures, and the emergence of new, more active mineral additives. Modifiers of concrete of the MB type, developed and manufactured on an industrial scale, made it possible to obtain fine-grained concrete of strength classes up to B90 with low permeability and corrosion resistance. At the same time, such concretes have insufficient tensile strength during bending, as well as high temperature and shrinkage deformations due to the increased consumption of cement. The challenge of improving the operational characteristics of fine-grained concrete is solved by reinforcing it with various types of metallic and non-metallic fibers of mineral or organic origin.

### **Problem statement**

This paper is a comparative review of earlier publications on the ductility of basalt fiber reinforced concrete, it analyzes and compares the ductility of lightweight BFRC and gravel BFRC.

### **Method and analysis**

This research paper is based on the review of research and experimental papers of other authors from which analysis will be drawn.

### **Ductility of lightweight basalt fiber reinforced concrete (BFRC)**

High strength of lightweight aggregate concrete leads to increased brittleness, therefore fiber reinforcement should be considered for improving strength and ductility.

Analyzing from the reviews detailed in this paper, lightweight aggregate concrete and the usual gravel coarse aggregate has the capability to increase its ductility when reinforced with basalt fiber. The volume of the fiber in the concrete mix affects the ductility growth. From 0.5% fiber increment in the concrete, a significant increase in the ductility of the concrete is seen. Adding lightweight aggregates to the concrete mix decreases the ductility of the concrete and at the same time increases the brittleness of the material. The shear and flexural definition of ductility index  $\mu$  consist of the ratio of the area of the load-deflection response. Shear ductility should only be measured on shear deformation [33].

Fiber volume fraction of 1.5% or higher achieves strain hardening faster than lower fiber volume fractions. By the addition of 10–20% fly ash and silica-

fume cement substitutes, the ductility and flexural strength of lightweight fiber-reinforced concrete are improved. This yields an increment of 50–150% flexural displacement (ductility) at ultimate load [24]. For lightweight aggregate fiber-reinforced concrete, ductility results from enforced crack resistance due to the fiber bridging concrete layers [34]. It can be concluded that adding fibers into the lightweight concrete mixtures increases the compressive strength of the concrete by 20%, tensile strength by 80% and flexural strength by 90% [35]. In multi-story buildings, the dead load is decreased by using structural lightweight concrete [19; 36; 37].

### Conclusion

Review of the literatures reveal that till date, significant research has been conducted regarding the strength of lightweight concrete incorporating basalt fibers. Most of these studies are limited to the application of basalt fibers in enhancing mechanical properties of concrete under monotonic loading. However, little attempt has been made so far to investigate the effect of chopped basalt fiber on reinforced cement concrete (RCC). The enlisted authors above have been able to conduct some experiments on ductility of basalt fiber reinforced concrete and lightweight concrete. An attempt that therefore shows the behavior, ductility and energy dissipation capacity of basalt fiber reinforced concrete.

The brittle nature of lightweight aggregate concrete leads to sudden and precipitated failure. Therefore, adding fiber reinforcement improves ductility of lightweight concrete or normal-weight high-strength concrete. The addition of fibers to lightweight aggregate concrete increases the peak and residual frictional stresses. Fiber reinforcement may prevent congestion when additional reinforcement is required to provide ductility.

Lightweight concrete beams and columns were seen to show more ductile behavior than normal concrete members and the analytical model reproduced the response with very good accuracy. Lightweight ductility was more pronounced in columns subjected to axial compression forces and bending.

From the review, it can be stated that concrete containing basalt fibers could depict less ductile behavior compared to concrete with other types of fibers for all volume fraction of fibers. Basalt fiber reinforced concrete has higher energy absorption capacity and the increased ductility. Basalt fibers easily disperse within the concrete mix without causing segregation and that the fibers lose their shape due to the flexible structure.

Lightweight concrete offers undeniable isolation advantages but the reduction in the overall cost generated by the lower dead loads is often overwhelmed by the higher production cost, especially with factory produced expanded clay lightweight aggregates. Lightweight concrete becomes however more challenging when using natural volcanic rocks reserves to produce lightweight aggregates. On the other hand, even if the reduced stiffness of lightweight concrete requires a tighter deflection control, its higher ultimate strain confers a major advantage to lightweight concrete in the form of improved ductility and better energy absorption capacity.

### References

1. *Basalt fiber for smarter building systems*. <https://basalt-fiber.com/#>
2. *Basaltic rocks and technologies for their use*. [http://www.naftaros.ru/kompozitsionnye\\_bazaltovye\\_tehno/index.html](http://www.naftaros.ru/kompozitsionnye_bazaltovye_tehno/index.html)
3. Dzhigiris D.D., Makhova M.F. (2002). *Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdelij: monografiya [Basics of the production of basalt fibers and products: monograph]*. Moscow: Teploenergetik Publ. (In Russ.)
4. Kharun M., Koroteev D.D., Dkhar P., Zdero S., Elroba S.M. (2018). Physical and mechanical properties of basalt-fibered high-strength concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(5), 396–403. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403> (In Russ.)
5. Malova Yu.G. (2010). *Fiziko-himicheskie svoystva steklobazal'tovykh alyumosilikatnykh volokon [Physico-chemical properties of glass basalt aluminosilicate fibers]* (Diss. Cand. Chem. Sciences). Khabarovsk. (In Russ.)
6. Roy B., Laskar A.I. (2017). Cyclic behaviour of in-situ exterior beam-column subassemblies with cold joint in column. *Engineering Structure*, (132), 822–833.
7. Olivia M., Mandal P. (2005). Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beam. *Journal of Civil Engineering*, 6(1), 1–13.
8. Satya M.S., Indrajit N.P., Jagruti S. (2015). Study of ductility properties by effective replacement of steel with basalt fibre reinforced polymer. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(3), 683–688.
9. Ahmet B.K., Nihat K., Veysel A., Swaptik C., Abdullah H.A. (2015). Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006>
10. Tassew S.T., Lubell A.S. (2014). Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete construct. *Building Materials*, 51, 215–224.

11. Faiz U.A.S. (2013). Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 43, 37–49.
12. Jiang C., Fan K., Wu F., Chen D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Material Destruction*, 58, 187–193.
13. Ablesimov N.E., Malova Yu.G. (2016). Stone (basalt) fiber: Research and scientific schools. *Scientific Review. Technical science*, (6), 5–9. (In Russ.)
14. Monjusha S., Biswajit R., Ruhul A.M., Aminul I.L. (2018). Effect of Chopped Basalt Fibers on the Cyclic Behavior of RCC Beam-Column Subassemblies. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), 1865–1874. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2801-y>
15. Park R. (1989). Evaluation of ductility of structures and structural subassemblages from laboratory testing. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 22(3), 155–166.
16. Elshekh A.E.A., Shafiq N., Nuruddin M.F., Fathi A. (2014). Evaluation the Effectiveness of Chopped Basalt Fiber on the Properties of High Strength Concrete. *Journal of Applied Sciences*, 14, 1073–1077.
17. Kharun M., Koroteev D. (2018). Effect of basalt fibers on the parameters of fracture mechanics of MB modifier based highstrength concrete. *MATEC Web of Conferences*, 251, 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102003>
18. Ludovico M.D., Prota A., Manfreidi G. (2010). Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement. *Journal of Composites for Construction*, 14(5), 541–552.
19. High C., Satssem H.M., Safty A.E., Rizkalla S.H. (2015). Use of basalt fibers for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 96, 37–46.
20. Kizilkanat A.B., Kabay N., Akyuncu V., Choudhury S., Akea A.H. (2015). Mechanical properties and fracture behaviour of basalt and glass FRC: experimental study. *Construction and Building Materials*, 100, 218–224.
21. Lipatov Y.V., Gutrikov S.I., Manylov M.S., Zhukovskaya E.S., Lazoryak B.I. (2015). High alkali resistant basalt fibers for reinforcing concrete. *Materials and Design*, 73, 60–66.
22. Hannawi K., Bian H., Agbodjan W.P., Raghavan B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behaviour of UHPC. *Composite Part B*, 86, 214–220.
23. ACI 213R-87. (1987). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*. American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
24. Hong Zhi C. (2007). *Mechanical properties of lightweight aggregate concrete – effect of lightweight aggregates on concrete* (PhD thesis). Hong Kong University.
25. Koh C.G., Teng M.Q., Wee T.H. (2008). A plastic-damage model for lightweight concrete and normal weight concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2(2), 123–136.
26. Muyasser M.J., Daham H.A., Saad M.R. (2011). Flexural behavior of lightweight concrete beams. *European Journal of Scientific Research*, 58(4), 582–592.
27. Russell H. (2007). *Current Provisions and Needed Research for Lightweight Concrete in Highway Bridges*. Publication No. FHWA-HRT-07-051. US Department of Transportation.
28. Waldron C.J., Cousins T.E., Nassar A.J., Gomez J.P. (2005). Demonstration of use of high-performance lightweight concrete in bridge superstructure in Virginia. *Journal of performance of Constructed Facilities*, 19(2), 146–154.
29. Katkhuda H., Hanayneh B., Shatarat N. (2009). Influence of silica fume on high strength of lightweight concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58, 781–788.
30. Yasar E., Atis C.D., Kilic A. (2004). High strength lightweight concrete made with ternary mixtures of cement, fly ash, silica fume, and scoria as aggregates. *Turkish Journal of Engineering, Environment and Science*, 28, 95–100.
31. Abdelhamid C., Jamal M.S., Saleh D. (2014). Ductility of reinforced lightweight concrete beams and columns. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(7), 1251–1274.
32. Buchkin A.V. (2011). *Melkozernistyj beton vysokoj korrozionnoj stojkosti, armirovannyj tonkim bazal'tovym voloknom [Fine-grained concrete of high corrosion resistance reinforced with thin basalt fiber]* (Diss. of Candidate of Technical Sciences). Moscow. (In Russ.)
33. Ahmad S.H., Xie Y., Yu T. (1995). Shear ductility of reinforced lightweight concrete beams of normal strength and high strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 17(2), 147–159.
34. Arisoy B., Wu H.C. (2008). Material characteristics of lightweight, high-performance concrete reinforced with PVA. *Construction and Building Materials*, 22(4), 635–645.
35. Wang H.T., Wang L.C. (2013). Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 38(2), 1146–1151.
36. Balaguru P., Foden A. (1996). Properties of fiber reinforced structural lightweight concrete. *American Concrete Institute Structural Journal*, 93, 1–12.
37. ACI Committee 544. (2005). State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. *ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002): Manual of Concrete Practice*. Michigan: American Concrete Institute.

## Исследование влияния дисперсного армирования базальтовой фиброй на пластические свойства легких бетонов на керамзитовом гравии

В.В. Галишникова<sup>1</sup>, П.Ч. Чиадигхикаоби<sup>1\*</sup>, Д.А. Эмири<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

<sup>2</sup>Технологический университет Кросс-Ривер, н/я 1123, Калабар, Федеративная Республика Нигерия

\*passydking2@mail.ru

### История статьи:

Поступила в редакцию: 14 мая 2019 г.

Доработана: 10 октября 2019 г.

Принята к публикации: 13 октября 2019 г.

### Для цитирования

Galishnikova V.V., Chiadighikaobi P.C., Emiri D.A. Comprehensive view on the ductility of basalt fiber reinforced concrete focus on lightweight expanded clay (Исследование влияния дисперсного армирования базальтовой фиброй на пластические свойства легких бетонов на керамзитовом гравии) // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 360–366. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-360-366>

### Аннотация

**Актуальность.** Пластичность базальтофибробетона является одним из основных свойств этого материала. Авторами обнаружено, что пластичность базальтофибробетона всесторонне не изучена. Проведенные ранее исследования недостаточны. **Цели.** В данной работе представлен обобщенный анализ и обзор существующих исследований пластичности легкого базальтофибробетона. **Методы.** Проведено комплексное исследование пластичности базальтофибробетона и заложена основа для лабораторного эксперимента по пластичности базальтофибробетона. **Результаты.** Исходя из результатов проведенного обзора, можно сделать вывод о том, что пластичность дисперсно армированного базальтофибробетона зависит как от процента содержания, так и от диаметра и длины базальтовой фибры. Увеличение процента дисперсно армированного базальтофибробетона увеличивает пластичность бетона.

**Ключевые слова:** армирование; пластичность легкого базальтофибробетона; керамзит

### Список литературы

1. Basalt fiber for smarter building systems. URL: <https://basalt-fiber.com/#>
2. Базальтовые породы и технологии их использования. URL: [http://www.naftaros.ru/kompozitsionnye\\_bazaltovye\\_tehno/index.html](http://www.naftaros.ru/kompozitsionnye_bazaltovye_tehno/index.html)
3. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. М.: Теплоэнергетик, 2002. 416 с.
4. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Здеро С., Эльроба С.М. Физические и механические свойства базальтоволоконного высокопрочного бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. Т. 14. № 5. С. 396–403. URL: <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403>
5. Малова Ю.Г. Физико-химические свойства стеклобазальтовых алюмосиликатных волокон: дис. ... канд. хим. наук. Хабаровск, 2010. 143 с.
6. Roy B., Laskar A.I. Cyclic behaviour of in-situ exterior beam-column subassemblies with cold joint in column // Engineering Structure. 2017. Vol. 132. Pp. 822–833.
7. Olivia M., Mandal P. Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beam // Journal of Civil Engineering. 2005. Vol. 6. No. 1. Pp. 1–13.
8. Satya M.S., Indrajit N.P., Jagruti S. Study of Ductility properties by effective replacement of Steel with Basalt Fibre Reinforced Polymer // International Journal of Engineering Research and General Science. 2015. Vol. 3. No. 3. Pp. 683–688.
9. Ahmet B.K., Nihat K., Veysel A., Swaptik C., Abdullah H.A. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: an experimental study // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 100. Pp. 218–224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006>
10. Tassew S.T., Lubell A.S. Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete Construct // Building Materials. 2014. Vol. 51. Pp. 215–224.
11. Faiz U.A.S. Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 43. Pp. 37–49.
12. Jiang C., Fan K., Wu F., Chen D. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete // Material Design. 2014. Vol. 58. Pp. 187–193.
13. Албесимов Н.Е., Малова Ю.Г. Каменное (базальтовое) волокно: научно-исследовательские и научные школы // Научное обозрение. Технические науки. 2016. № 6. С. 5–9.

Галишникова Вера Владимировна, доктор технических наук, профессор, директор департамента строительства Инженерной академии.

Чиадигхикаоби Паскал Чимеремезе, аспирант департамента строительства Инженерной академии.

Эмири Дафе Анижан, преподаватель департамента строительства.

14. *Monjusha S., Biswajit R., Ruhul A.M., Aminul I.L.* Effect of Chopped Basalt Fibers on the Cyclic Behavior of RCC Beam-Column Subassemblies // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. Vol. 43. No. 4. Pp. 1865–1874. URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2801-y>
15. *Park R.* Evaluation of ductility of structures and structural subassemblages from laboratory testing // *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*. 1989. Vol. 22. No. 3. Pp. 155–166.
16. *Elshekh A.E.A., Shafiq N., Nuruddin M.F., Fathi A.* Evaluation the Effectiveness of Chopped Basalt Fiber on the Properties of High Strength Concrete // *Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 14. Pp. 1073–1077.
17. *Kharun M., Koroteev D.* Effect of basalt fibers on the parameters of fracture mechanics of MB modifier based highstrength concrete // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. Article No. 02003. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102003>
18. *Ludovico M.D., Prota A., Manfredi G.* Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement // *Journal of Composites for Construction*. 2010. Vol. 14. No. 5. Pp. 541–552.
19. *High C., Satssem H.M., Safty A.E., Rizkalla S.H.* Use of basalt fibers for concrete structures // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 96. Pp. 37–46.
20. *Kizilkanat A.B., Kabay N., Akyuncu V., Choudhury S., Akea A.H.* Mechanical properties and fracture behaviour of basalt and glass FRC: experimental study // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 100. Pp. 218–224.
21. *Lipatov Y.V., Gutrikov S.I., Manylov M.S., Zhukovskaya E.S., Lazoryak B.I.* High alkali resistant basalt fibers for reinforcing concrete // *Materials and Design*. 2015. Vol. 73. Pp. 60–66.
22. *Hannawi K., Bian H., Agbodjan W.P., Raghavan B.* Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behaviour of UHPC // *Composite Part B*. 2016. Vol. 86. Pp. 214–220.
23. ACI 213R-87. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete / American Concrete Institute. Detroit, Michigan, 1987.
24. *Hong Zhi C.* Mechanical properties of lightweight aggregate concrete – effect of lightweight aggregates on concrete: PhD thesis / Hong Kong University. 2007. 270 p.
25. *Koh C.G., Teng M.Q., Wee T.H.* A plastic-damage model for lightweight concrete and normal weight concrete // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2008. Vol. 2. No. 2. Pp. 123–136.
26. *Muyasser M.J., Daham H.A., Saad M.R.* Flexural behavior of lightweight concrete beams // *European Journal of Scientific Research*. 2011. Vol. 58. No. 4. Pp. 582–592.
27. *Russell H.* Current Provisions and Needed Research for Lightweight Concrete in Highway Bridges // Publication No. FHWA-HRT-07-051 / US Department of Transportation. 2007.
28. *Waldron C.J., Cousins T.E., Nassar A.J., Gomez J.P.* Demonstration of use of high-performance lightweight concrete in bridge superstructure in Virginia // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2005. Vol. 19. No. 2. Pp. 146–154.
29. *Katkhuda H., Hanayneh B., Shatarat N.* Influence of silica fume on high strength of lightweight concrete / *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009. P. 5.
30. *Yasar E., Atis C.D., Kilic A.* High strength lightweight concrete made with ternary mixtures of cement, fly ash, silica fume, and scoria as aggregates // *Turkish Journal of Engineering, Environment and Science*. 2004. Vol. 28. Pp. 95–100.
31. *Abdelhamid C., Jamal M.S., Saleh D.* Ductility of reinforced lightweight concrete beams and columns // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2014. Vol. 11. No. 7. Pp. 1251–1274.
32. *Бучкин А.В.* Мелкозернистый бетон высокой коррозионной стойкости, армированный тонким базальтовым волокном: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 130 с.
33. *Ahmad S.H., Xie Y., Yu T.* Shear ductility of reinforced lightweight concrete beams of normal strength and high strength concrete // *Cement and Concrete Composites*. 1995. Vol. 17. No. 2. Pp. 147–159.
34. *Arisoy B., Wu H.C.* Material characteristics of lightweight, high-performance concrete reinforced with PVA // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. No. 4. Pp. 635–645.
35. *Wang H.T., Wang L.C.* Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38. Pp. 1146–1151.
36. *Balaguru P., Foden A.* Properties of fiber reinforced structural lightweight concrete // *American Concrete Institute Structural Journal*. 1996. Vol. 93. Pp. 1–12.
37. ACI Committee 544. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete // ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002): manual of concrete practice. Michigan: American Concrete Institute, 2005.

## ТЕОРИЯ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК THEORY OF THIN ELASTIC SHELLS

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-367-373  
УДК 624.042:539.3

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

### Выбор оптимальной оболочки покрытия на квадратном плане в виде поверхности переноса

Е.М. Тупикова

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6  
tupikova-em@rudn.ru

#### История статьи:

Поступила в редакцию: 10 июля 2019 г.  
Доработана: 22 сентября 2019 г.  
Принята к публикации: 02 октября 2019 г.

#### Аннотация

**Цели.** В статье произведен анализ и сравнение результатов статического расчета оболочек на действие распределенной нагрузки типа собственного веса. Исследованы оболочки переноса с одинаковыми габаритными размерами четырех видов: поверхности переноса цепной линии по цепной, окружности по окружности, эллипса по эллипсу и синусоиды по синусоиде. **Методы.** Для расчетов применялся метод конечных элементов. Исследование проводилось для оболочек из материала с характеристиками условного железобетона. **Результаты.** Сравнительный анализ результатов показал, что наиболее выгодное для строительных конструкций поведение под нагрузкой демонстрируют оболочки в форме поверхности переноса цепной линии по цепной и окружности по окружности. Наихудшими для железобетонного строительства являются оболочки в форме поверхности переноса эллипса по эллипсу. Выявлены особенности напряженно-деформированного состояния перечисленных объектов, представляющие интерес для потенциального внедрения таковых в практику проектирования и строительства.

**Ключевые слова:** поверхности прямого переноса; тонкие упругие оболочки; метод конечных элементов; статический расчет

#### Для цитирования

Тупикова Е.М. Выбор оптимальной оболочки покрытия на квадратном плане в виде поверхности переноса // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 367–373. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-367-373>

### Введение

Оболочки в форме поверхностей переноса имеют перспективы для применения в архитектуре ввиду их эстетической выразительности в сочетании с малым весом и объемом материала [16].

Выбор оболочек с близкими габаритными размерами и различной геометрией занимает ученых-механиков начиная с В.В. Новожилова [1]. Многие работы посвящены исследованию такой

проблемы, но подавляющее большинство исследований реализованы для уже хорошо изученных и зарекомендовавших себя форм, в частности куполов на основе различных поверхностей вращения [1–4]. Имеются также исследования на тему сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния оболочек вращения неканонической формы [5–9]. Помимо этого, для оболочек вращения разработаны и апробированы несколько критериев их оптимальности [10]. Работ, посвященных выбору оптимальных оболочек переноса, значительно меньше.

В данной статье рассмотрены четыре оболочки в форме поверхностей переноса, перекрывающие квадратный план. Предполагается, что конструкции могут быть изготовлены путем торкре-

Тупикова Евгения Михайловна, кандидат технических наук, ассистент департамента строительства Инженерной академии. eLIBRARY SPIN-код: 5501-6984.

© Тупикова Е.М., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

тирования, нанесения бетонного раствора на арматурные сетки соответствующей геометрии. Выбраны формы, которые технологически возможно было бы изготовить из металлических стержней или сеток: поверхность переноса окружности по окружности, цепной линии по цепной линии, эллипса по эллипсу и синусоиды по синусоиде.

## 1. Цель исследования

Целью данной работы является выбор оптимальной с точки зрения напряженно-деформированного состояния формы оболочки для покрытия квадратного в плане здания размером 6×6 м из железобетона. На примере такого объекта предполагается изучить особенности работы оболочек четырех разных форм в виде поверхностей переноса, выбрать из них оптимальные для применения в практике строительства, выявить нерациональные варианты, обозначить основные трудности, возможные при проектировании, и пути их разрешения.

## 2. Материалы и методы

Уравнения поверхностей прямого переноса общеизвестны. Они приводятся в литературе [11; 12]. Произведено геометрическое моделирование и конечно-элементный анализ оболочек на основе четырех явных уравнений поверхностей.

### 2.1. Поверхность переноса цепной линии по цепной линии

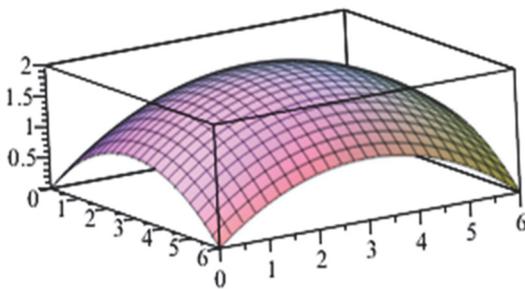


Рис. 1. Поверхность переноса цепной линии по цепной линии  
[Figure 1. Surface of translation of catenary curve along catenary curve]

$$z = -a \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{x-b}{a}\right) + a \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{b}{a}\right) - d \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{y-c}{d}\right) + d \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{c}{d}\right).$$

$$c = b = 3 \text{ м}, a = d = 4,657746 \text{ м}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $d$  – параметры, связанные со стрелой подъема;  $b$  и  $c$  – половина размера в плане вдоль координатных осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Стрела подъема в данном случае определена с некоторой погрешностью (порядка  $10^{-6}$  м), поскольку не может быть выражена в явном виде из уравнения поверхности.

### 2.2. Поверхность переноса окружности по окружности (тороид)

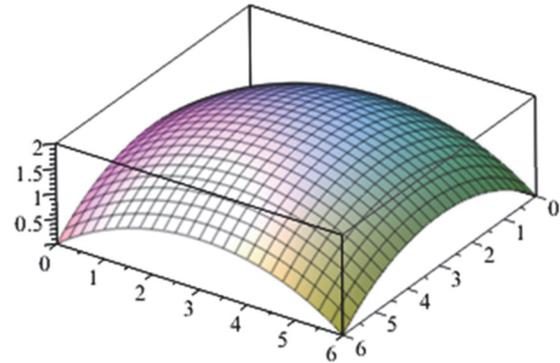


Рис. 2. Поверхность переноса окружности по окружности  
[Figure 2. Surface of translation of circle curve along circle]

$$z = \left(r_1^2 - \left(x + \frac{a}{2}\right)^2\right)^{0.5} - \left(r_1^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2\right)^{0.5} + \left(r_2^2 - \left(y - \frac{b}{2}\right)^2\right)^{0.5} - \left(r_2^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2\right)^{0.5},$$

$$a = b = 6 \text{ м}, r_1 = r_2 = 5 \text{ м}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – размеры в плане вдоль координатных осей  $x$  и  $y$ ;  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы направляющей и образующей окружностей соответственно.

### 2.3. Поверхность переноса эллипса по эллипсу

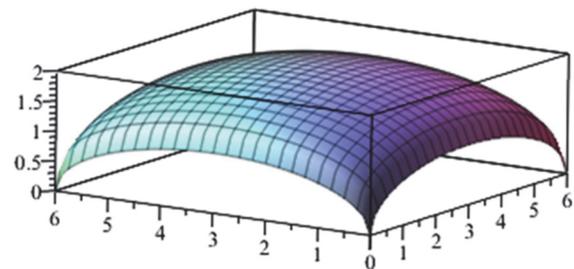


Рис. 3. Поверхность переноса эллипса по эллипсу  
[Figure 3. Surface of transition of ellipse along ellipse]

$$z = f_1 - b + \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\left(a^2 - \left(x - \frac{c}{2}\right)^2\right)} + f_2 - m + \frac{m}{n} \cdot \sqrt{\left(n^2 - \left(y - \frac{d}{2}\right)^2\right)},$$

$$a = n = 3, b = m = 1, c = d = 6, f_1 = f_2 = 1, \quad (3)$$

где  $f_1$  – стрела подъема эллипсов, лежащих в плоскостях  $y = 0$  и  $y = d$ ;  $f_2$  – стрела подъема эллипсов, лежащих в плоскостях  $x = 0$  и  $x = c$ ;  $c$  и  $d$  – размеры в плане;  $a, b$  – полуоси эллипсов, получающихся в сечениях плоскостями  $y = \text{const}$ ;  $m, n$  – полуоси эллипсов, получающихся в сечениях  $x = \text{const}$ .

#### 2.4. Поверхность переноса синусоиды по синусоиде

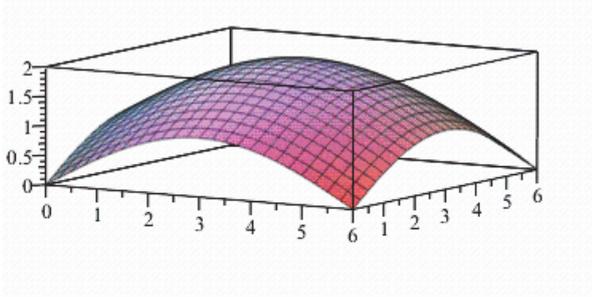


Рис. 4. Поверхность переноса синусоиды по синусоиде  
[Figure 4. Surface of transition of sinusoid curve along sinusoid]

$$z = c \cdot \sin\left(\frac{1 \cdot \pi \cdot x}{a}\right) + d \cdot \sin\left(\frac{1 \cdot \pi \cdot y}{b}\right),$$

$$a = b = 6 \text{ м}, c = d = 1 \text{ м},$$

где  $a$  и  $b$  – длины отрезков, на которых умещается одна полуволна синусоиды в направлениях  $x$  и  $y$  соответственно;  $c$  и  $d$  – амплитуды синусоид.

Каждая оболочка имеет размеры в плане  $6 \times 6$  м, стрелу подъема 2 м и толщину 8 см, расчетные характеристики материала – условного железобетона  $E = 325 \text{ Мпа}$ ,  $\nu = 0.17$ . Оболочки опираются на жесткие диафрагмы, таким образом, по всем краям закрепление жесткое. К оболочкам приложена

внешняя нагрузка типа собственного веса величиной  $10000 \text{ Н/м}^2$ .

Методом конечных элементов произведен статический расчет оболочек. Метод конечных элементов реализован в программном комплексе ANSYS 15 APDL при помощи четырехугольных элементов shell181 [13].

Длина стороны элемента 25 см. Модель оболочки имеет  $27 \times 27 = 729$  узлов и, соответственно, 676 элементов, что достаточно для целей данного расчета.

Получены изополю перемещений и силовых факторов, а также эпюры вдоль линии, проходящей через центр оболочки и середины противоположных сторон.

На первый взгляд, построение эквивалентных напряжений (по Мизесу) для условного материала без учета армирования не имеет смысла, но на самом деле эти изополю могут дать примерную картину расположения проблемных с точки зрения армирования зон, требующих усиления.

### 3. Результаты

Далее приведены эпюры в срединных сечениях (половина, так как схема симметричная). На рисунках эпюры и изополю размещены в следующем порядке:  $a$  – для поверхности переноса цепной линии по цепной,  $b$  – для поверхности переноса окружности по окружности,  $v$  – для поверхности переноса эллипса по эллипсу,  $z$  – для поверхности переноса синусоиды по синусоиде.

В оболочках типа «эллипсоид по эллипсоиду» и «синус по синусу» возникают также поперечные и перерезывающие силы, сопоставимые с нормальными.

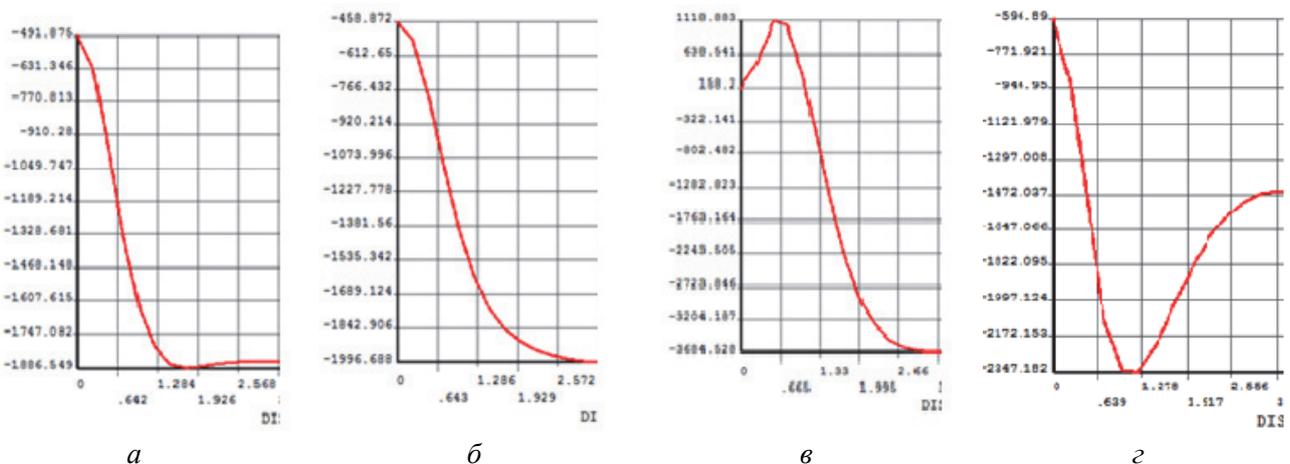


Рис. 5.  $N_{11}$  нормальные силы  
[Figure 5.  $N_{11}$  is axial force]

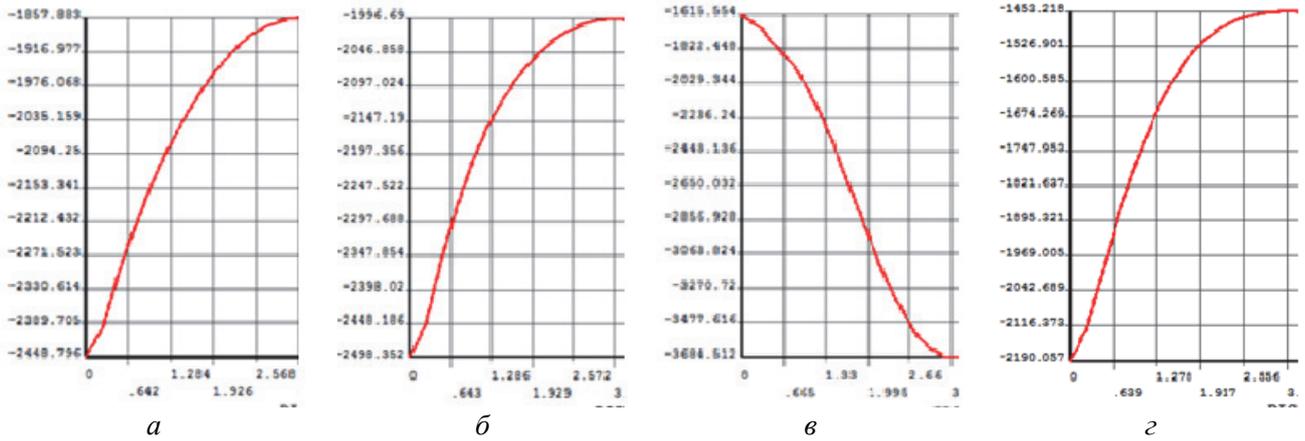


Рис. 6.  $N_{22}$  нормальные силы  
 [Figure 6.  $N_{22}$  is axial force]

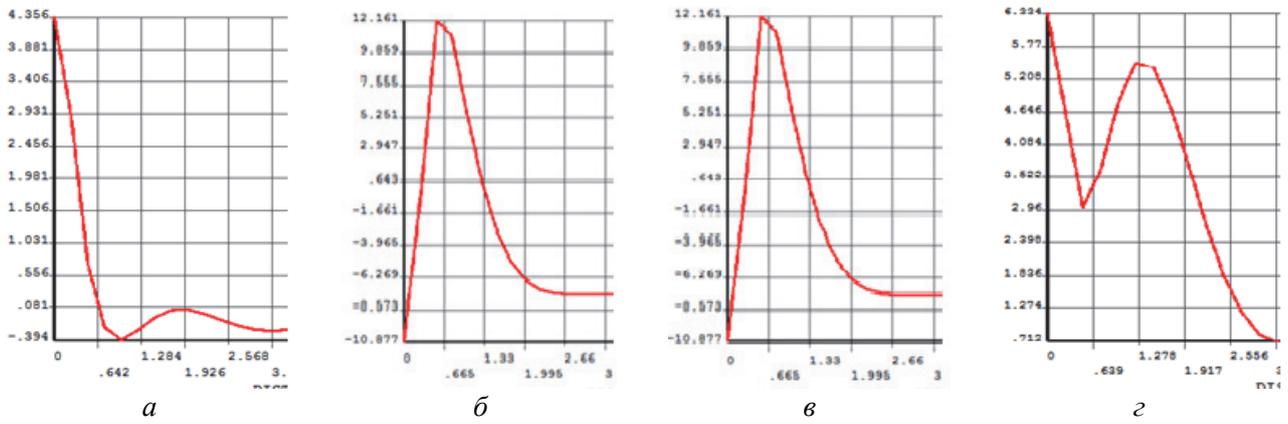


Рис. 7. Изгибающие моменты  $M_{11}$   
 [Figure 7. Bending moments  $M_{11}$ ]

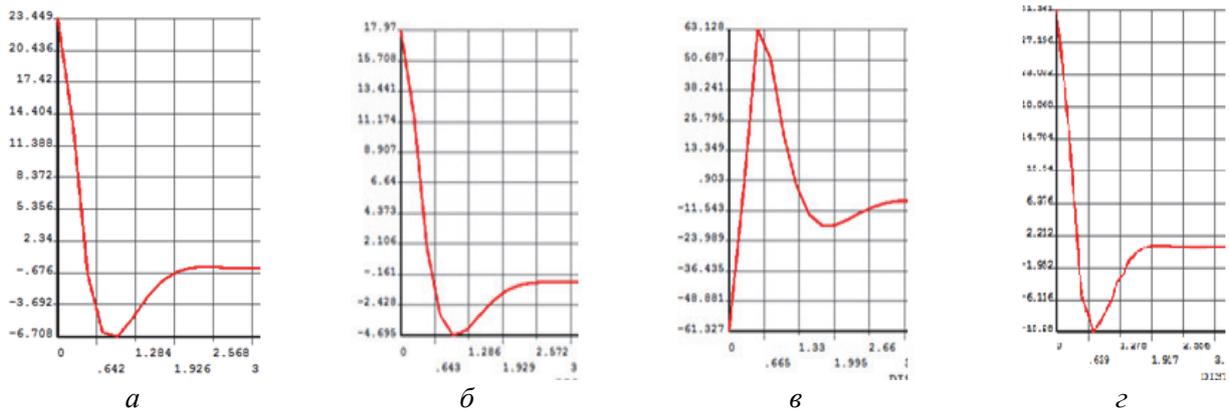


Рис. 8. Изгибающие моменты  $M_{22}$   
 [Figure 8. Bending moments  $M_{22}$ ]

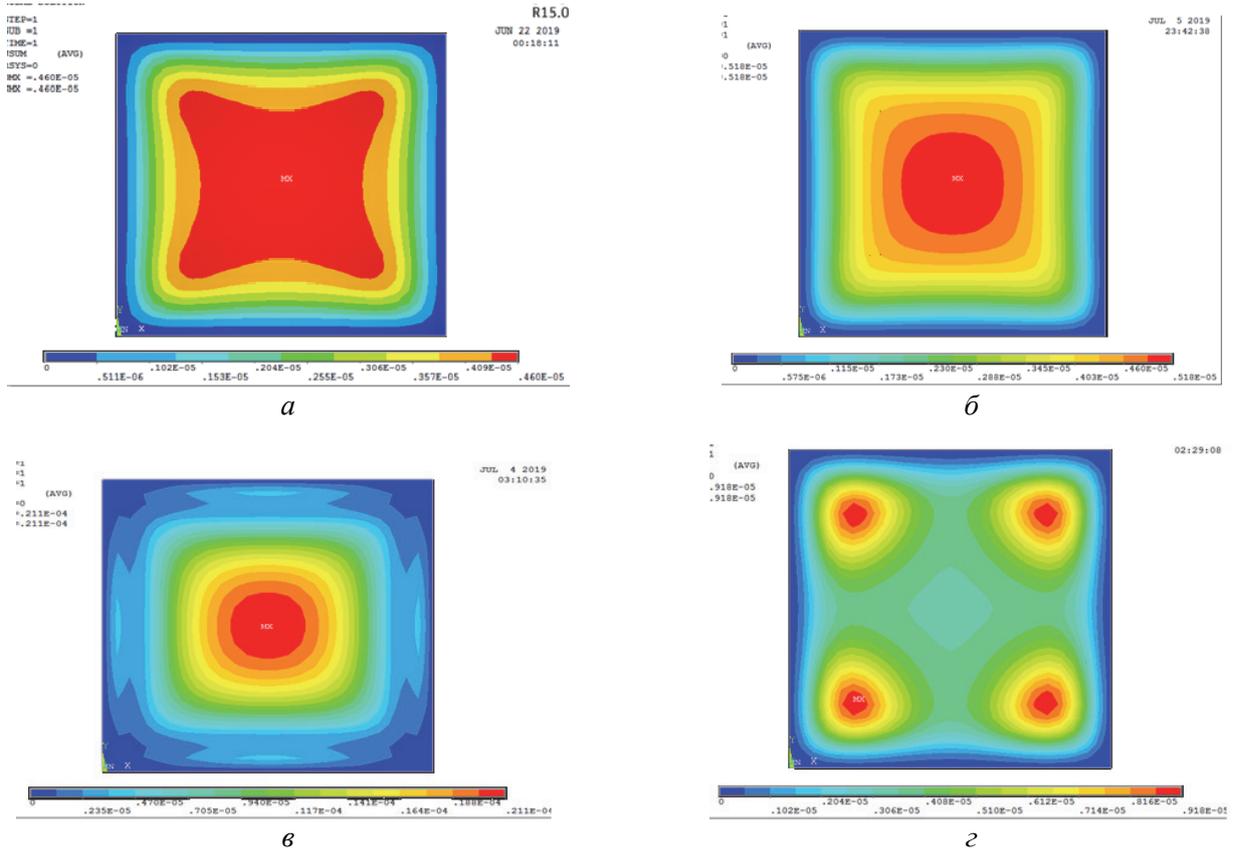


Рис. 9. Изополя прогибов  
[Figure 9. Deflection isofields]

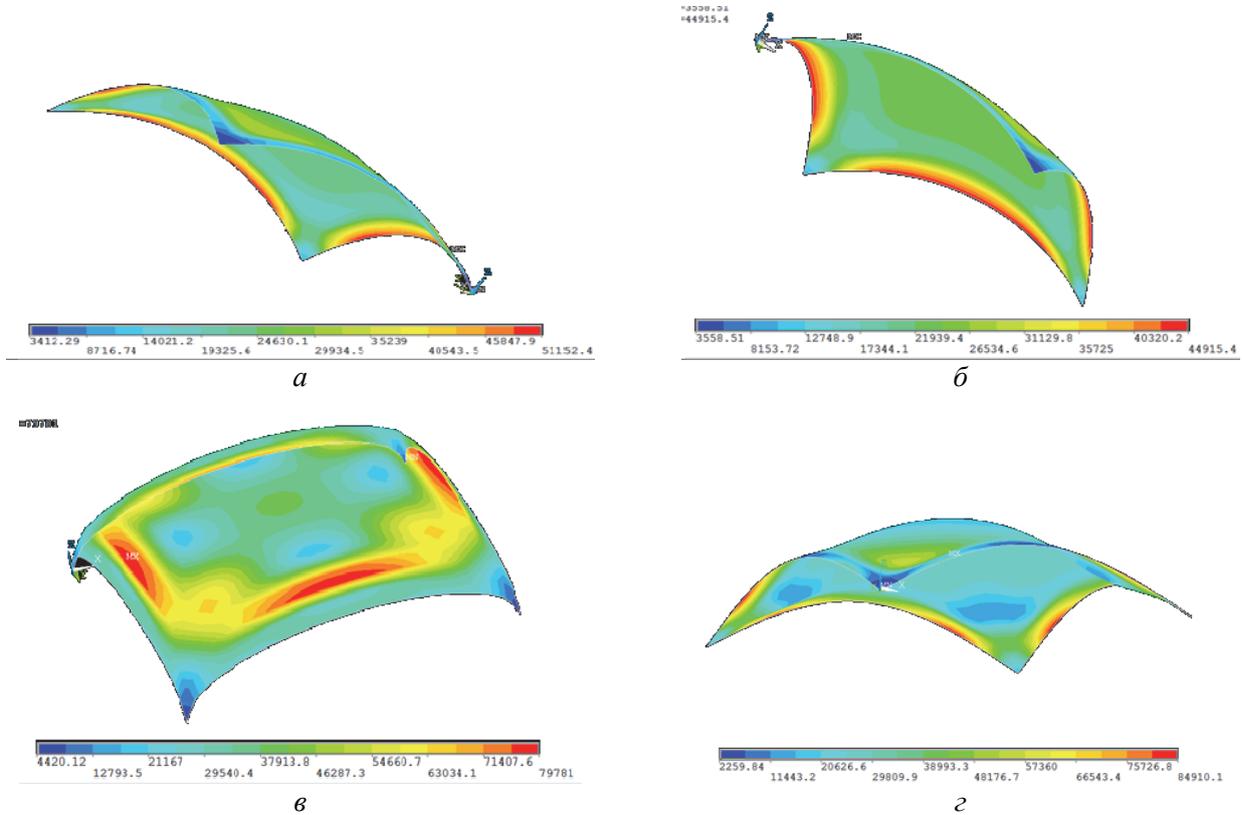


Рис. 10. Эквивалентные напряжения по Мизесу  
[Figure 10. Equivalent stress (von Mises stress) isofields]

Сравнение максимальных усилий и перемещений  
[Table. The comparison of maximum stresses and strain]

	$N_1$	$N_2$	$M_1$	$M_2$	$uz$	$Q_{23}$	$N_{12}$	$\sigma_{\text{экв}} [\sigma_{\text{equiv}}]$
Цепная [Catenary]	-1886	-2448	4,35	23,45	$4,6^{*10^{-6}}$	–	–	51152
Окружность [Circle]	-1996	-2498	3,34	17,97	$5,18^{*10^{-6}}$	–	–	44900
Эллипс [Ellipse]	+1118/-3684	-3684	-10,87	-61,33	$2,11^{*10^{-5}}$	592	146	79780
Синус [Sinus]	-2347	-2190	6.33	31.36	$9,18^{*10^{-6}}$	–	175	84910

## Выводы

По результатам проведенных численных экспериментов можно сделать следующие выводы:

– поверхности переноса окружности по окружности и цепной линии по цепной имеют сравнительно меньшие значения нормальных сил и моментов;

– поверхность переноса синусоида по синусоиде имеет наименьший прогиб в центре и локальные максимумы моментов (максимумы располагаются не в центре оболочки);

– эллипс по эллипсу – наименее выгодная оболочка по значениям силовых факторов, возникают растягивающие, поперечные и перерезывающие силы, для железобетона требуется усиленное армирование;

– все оболочки имеют зоны больших эквивалентных напряжений по контуру опирания и в углах. Наименее эта проблема выражена в случае поверхности переноса окружности по окружности, наиболее остро (самые большие напряжения) у поверхности переноса синусоида по синусоиде. Для железобетонной конструкции это означает, что потребуется усиление армирования для восприятия данных напряжений.

Перспективы данного исследования заключаются в дальнейшем рассмотрении особенностей работы таких оболочек с точки зрения устойчивости, динамики и ударных воздействий.

## Список литературы

1. Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. Ленинград: Политехника, 1991. 656 с.
2. Ram Ranjan Sahu, Pramod Kumar Gupta. Blast Diffusion by Different Shapes of Domes // Defense Science Journal. 2015. Vol. 65. No. 1. Pp. 77–82.
3. Nick B. Search for dome // 3D Warehouse / Trimble Inc. The Netherlands, 2017. URL: <https://extensions.sketchup.com/>
4. Гмирач К.М., Козлов А.В., Проскуров Р.А. Подбор оптимальных параметров эллипсоидной железобе-

тонной оболочки вращения // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 02 (56). Ч. 3. С. 100–104.

5. Prabhavati P., Vankudre S.B., Varur Veeresh. Optimization of RCC Dome // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2014. Vol. 3. Issue 6. Pp. 1515–1519.

6. Zingoni A. Parametric stress distribution in shell-of-revolution sludge digesters of parabolic ogival form // Thin-Walled Structures. 2002. Vol. 40. Pp. 691–702.

7. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Псевдосферические оболочки в строительной индустрии // Строительство и реконструкция. 2018. № 2 (76). С. 32–40.

8. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Катеноидные оболочки // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 7–13.

9. Кривошапко С.Н. Оболочки вращения неканонических форм // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 7 (715). С. 66–79.

10. Krivoshapko S.N. Optimal shells of revolution and main optimizations // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 3. С. 201–209.

11. Encyclopédie Des Formes Mathématiques Remarquables Surfaces. URL: <http://mathcurve.com/surfaces/surfaces.shtml>

12. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer, 2015.

13. Kohnke P. ANSYS: Theory Reference. Release 5.6. ANSYS Inc., 1999.

14. Adriaenssens Sigrid, Veenendaal Diederik, Williams Chris J.K. Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge, 2014. 323 p.

15. Jasion P., Magnucki K. Buckling and post-buckling analysis of untypical shells of revolution // Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation: Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC-2016. 2016. Pp. 766–771.

16. Gbaguidi Aissè G.L. Influence of the geometrical researches of surfaces of revolution and translation surfaces on design of unique structures // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 4. С. 308–314. URL: <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-308-314>

## Optimization study of shape of translational shell of square plan

Evgeniya M. Tupikova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation  
tupikova-em@rudn.ru

### Article history:

Received: July 10, 2019

Revised: September 03, 2019

Accepted: October 02, 2019

### For citation

Tupikova E.M. (2019). Optimization study of shape of translational shell of square plan. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 367–373. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-367-373>. (In Russ.)

### Abstract

**The aim of the work.** The static analysis and comparison of the results for translational shells under equally distributed load of dead weight are provided. The shells of the similar general dimensions in plan and rise of four different types: translation of catenary along catenary, circle along circle, ellipse along ellipse and sinusoid along sinusoid are investigated. **Methods.** The finite element method was applied for the analysis. The research was conducted for the shells of material of reinforced concrete characteristics. **Results.** The comparison has shown that shells of catenary and circle translation surface demonstrate the most advantageous behavior under loading; the worst results for reinforced concrete were got for ellipse along ellipse translation shell. The peculiarities of each type behavior were revealed, that is of interest for their prospective reduction to practice of structural design.

**Keywords:** translational surface; thin elastic shell; finite element method; static analysis

### References

1. Novozhilov V.V., Chernyh K.F., Mihajlovskij E.I. (1991). *Linejnaya teoriya tonkih obolochek [Linear theory of thin shells]*. Leningrad: Politehnika Publ. (In Russ.)
2. Ram Ranjan Sahu, Pramod Kumar Gupta. (2015). Blast Diffusion by Different Shapes of Domes. *Defense Science Journal*, 65(1), 77–82.
3. Nick B. (2017). Search for dome. 3D Warehouse. The Netherlands, Trimble Inc. <https://extensions.sketchup.com/>
4. Gmirach K.M., Kozlov A.V. (2017). Podbor optimal'nyh parametrov ellipsoidnoj zhelezobetonnoj obolochki vrashcheniya [Selection of optimal parameters of an ellipsoid reinforced concrete shell of revolution]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]*, 2(56), part 3, 100–104. (In Russ.)
5. Prabhavati P., Vankudre S.B., Varur Veeresh. (2014). Optimization of RCC Dome. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(6), 1515–1519.
6. Zingoni A. (2002). Parametric stress distribution in shell-of-revolution sludge digesters of parabolic ogival form. *Thin-Walled Structures*, 40, 691–702.
7. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. (2018). Pseudo-spherical shells in building industry. *Building and Reconstruction*, 2(76), 32–40. (In Russ.)
8. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. (2018). Catenoidal shells. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 12, 7–13. (In Russ.)
9. Krivoshapko S.N. (2018). Shells of revolution of non-trivial forms. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo*, 7(715), 66–79. (In Russ.)
10. Krivoshapko S.N. (2019). Optimal shells of revolution and main optimizations. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(3), 201–209. (In Russ.)
11. *Encyclopédie Des Formes Mathématiques Remarquables Surfaces*. <http://mathcurve.com/surfaces/surfaces.shtml>
12. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. (2015). *Encyclopaedia of Analytical Surfaces*. Springer International Publishing, Switzerland.
13. Kohnke P. (1999). ANSYS: Theory Reference. Release 5.6. ANSYS Inc.
14. Adriaenssens Sigrid, Veenendaal Diederik, Williams Chris J.K. (2014). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge.
15. Jasion P., Magnucki K. (2016). Buckling and post-buckling analysis of untypical shells of revolution. Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation: Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC-2016 (pp. 766–771).
16. Gbaguidi Aïssè G.L. (2019). Influence of the geometrical researches of surfaces of revolution and translation surfaces on design of unique structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(4), 308–314. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-308-314>

Evgeniya M. Tupikova, PhD Civil Engineering, Assistant Professor of Department of Civil Engineering, Engineering Academy.

## ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ NUMERICAL METHODS OF ANALYSIS OF STRUCTURES

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-374-383  
УДК 69:624.074:624.012.4

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

### Сравнительный анализ результатов определения параметров напряженно-деформированного состояния оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом в основании

В.Н. Иванов, О.О. Алёшина\*

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6  
\*xiaofeng@yandex.ru

#### История статьи:

Поступила в редакцию: 02 мая 2019 г.  
Доработана: 15 августа 2019 г.  
Принята к публикации: 12 сентября 2019 г.

#### Аннотация

**Актуальность.** Тонкостенные конструкции типа оболочек составляют обширный класс в архитектуре, гражданском и промышленном строительстве, машиностроении и приборостроении, в авиа-, ракето- и кораблестроении и т.д. Каждая поверхность имеет определенные преимущества перед другими. Так, торсовая поверхность может быть развернута на плоскость всеми ее точками без складок и разрывов, при этом длины кривых и углы между любыми кривыми, принадлежащими поверхности, не изменяются. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом в основании представлено на сегодняшний день в малом объеме. **Цель.** Получение данных для сравнительного анализа результатов напряженно-деформированного состояния торсовых оболочек одинакового ската с направляющим эллипсом в основании методом конечных элементов и вариационно-разностным методом. **Методы.** Для оценки напряженно-деформированного состояния оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом в основании используется вычислительный комплекс SCAD Office на основе метода конечных элементов и программа PLATEVRM, написанная на основе вариационно-разностного метода. **Результаты.** Получены и проанализированы численные результаты напряженно-деформированного состояния торсовой оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом в основании, выявлены плюсы и минусы результатов расчетов методом конечных элементов (МКЭ) и вариационно-разностным методом (ВРМ).

**Ключевые слова:** теория тонких оболочек; торсовая оболочка; поверхность одинакового ската; геометрическое моделирование; вычислительный комплекс SCAD Office; метод конечных элементов; вариационно-разностный метод

#### Для цитирования

Иванов В.Н., Алёшина О.О. Сравнительный анализ результатов определения параметров напряженно-деформированного состояния оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом в основании // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 374–383. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-374-383>

#### Введение

С появлением аналитических, а затем и численных методов расчета оболочек, возникших в ре-

зультате успехов строительной механики и техники возведения зданий и сооружений, строительство и архитектура обогатились неизвестными ранее конструктивно-архитектурными элементами. Современное развитие вычислительной техники и состояние строительной сферы позволяют более широко внедрять большепролетные пространственные конструкции в практику строительства.

Для расчета сложных структур и оболочек используются различные аналитические [1], численно-аналитические и численные методы [2]. К численным методам относят метод конечных элемен-

Иванов Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор департамента строительства Инженерной академии. ORCID iD: 0000-0003-4023-156X. eLIBRARY SPIN-код: 3110-9909.

Алёшина Ольга Олеговна, инженер, аспирант департамента строительства Инженерной академии. eLIBRARY SPIN-код: 8550-4986.

© Иванов В.Н., Алёшина О.О., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

тов (МКЭ), вариационно-разностный метод (ВРМ), метод конечных разностей (МКР) и др., к численно-аналитическим – метод Канторовича – Власова, метод Ритца – Тимошенко, метод Бубнова – Галеркина и др. Аналитические методы применяются для узкого класса пространственных конструкций или для их приближенного расчета.

Современные пространственные конструкции возводятся с использованием разнообразных видов материалов, в том числе железобетона [3], дерева [4], пластмасс и композитов [5]. Широко применяются компьютерные расчеты, экспериментальные исследования, современные методы моделирования [6; 7], новые технологии и возможности строительного-монтажного оборудования.

### 1. Метод конечных элементов

На сегодняшний день существуют несколько численных методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) зданий и сооружений, которые реализованы в виде расчетных программ. Наиболее широко применяется метод конечных элементов.

Метод конечных элементов [8; 9] начал разрабатываться в середине 1960-х годов и является в настоящее время самым эффективным способом численного решения огромного ряда статических и динамических задач. Данный метод расчета реализован во многих компьютерных комплексах в России и за рубежом, например, ANSYS ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)), NASTRAN ([www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com)), COSMOS ([www.cosmosm.com](http://www.cosmosm.com)), а также SCAD ([www.scadgroup.com](http://www.scadgroup.com)) [10] и PROKON ([www.prokon.com](http://www.prokon.com)).

Достоинством любой компьютерной расчетной системы на базе МКЭ является то, что пользователь может не знать ни принципы, ни последовательности, ни основы данного метода. Инженер должен знать решаемую задачу и уметь ввести исходные данные так, чтобы можно было использовать вычислительный комплекс. При расчете здания или сооружения с помощью ЭВМ предусматривается замена реальной конструкции соответствующей расчетной схемой. Данная операция является самой ответственной и важной частью вычислительного процесса, поэтому необходимо создать расчетную модель, как можно ближе соответствующую действительным условиям работы. При создании расчетной схемы учитываются геометрические и физические характеристики конструкции, условия опирания, распределение нагрузок и т.п. В результате расчета получаем перемещения узлов, напряжения в элементах оболочек и внутренние усилия в стержневых элементах.

Несмотря на кажущуюся простоту использования расчетных программ, существуют сложности и даже минусы работы с данными компьютерными комплексами. Невозможность полного соответствия реальной конструкции и расчетной модели, неточности моделирования (аппроксимации) расчетной схемы являются одними из основных ошибок [11; 12]. Кроме того, А.В. Перельмутер отмечает: «...ответственность за используемые результаты компьютерных программ лежит на пользователе. Даже на абсолютно безошибочную программу нельзя возложить ответственность за достоверность задаваемой информации и тем более за принимаемые расчетные предпосылки. И это относится к наиболее сложной части автоматизированного проектирования – выполнению статических и динамических расчетов объекта...» [12].

Учитывая отмеченные выше достоинства МКЭ, положим его в основу дальнейших исследований НДС линейчатых оболочек одинакового ската.

### 2. Вариационно-разностный метод

Вариационно-разностный метод также хорошо зарекомендовал себя и широко используется на практике [9; 13]. Оба, ВРМ и МКЭ, основаны на принципе Лагранжа, то есть в основу положен принцип минимума полной энергии деформаций. В отличие от МКЭ, в котором сооружение разбивается на конечные элементы, и перемещения в этих конечных элементах аппроксимируются функциями формы, в ВРМ на поверхность рассчитываемой конструкции наносится разностная сетка, производные в функционале полной энергии деформаций заменяются разностными отношениями.

Вариационно-разностный метод обладает неоспоримым преимуществом, позволяет инженерам-расчетчикам самостоятельно написать программы с помощью языков программирования для расчета конструкций. Таким образом, у данного метода более простая программная реализация. Более того, в работе [9] подчеркивается, что сравнение результатов расчета МКЭ и ВРМ при одинаковых сетках показывает близкую точность, а в ряде случаев ВРМ дает даже большую точность результатов.

Проверим это утверждение на примере тонкой оболочки одинакового ската с эллипсом в основании.

### 3. Краткая информация об оболочках одинакового ската

Поверхность одинакового ската является развертываемой поверхностью, которая образовывается касательными линиями к своему ребру возврата. У конуса ребро возврата вырождается в точ-

ку, а у цилиндра удаляется на бесконечность. Если взять эллипс в качестве направляющей кривой, то прямые линии равного наклона к плоскости эллипса будут образовывать торсовую поверхность одинакового ската (рис. 1). Оболочка, имеющая поверхность одинакового ската в качестве срединной поверхности, будет, соответственно, называться оболочкой одинакового ската.

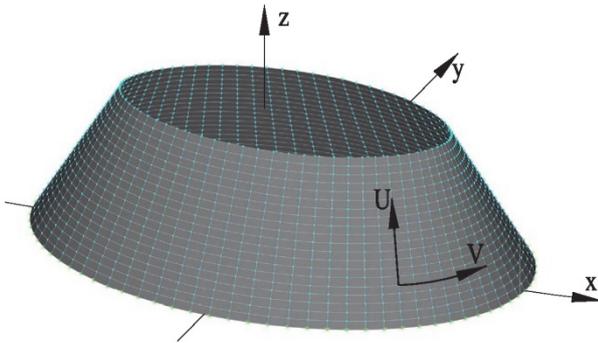


Рис. 1. Расчетная модель (общий вид)  
[Figure 1. Computational model (general view)]

Пусть направляющий эллипс в основании задается уравнениями

$$x = x(v) = a \cos v, \quad y = y(v) = b \sin v, \quad (1)$$

тогда параметрические уравнения поверхности одинакового ската будут иметь следующий вид [1; 14; 15]:

$$x = x(u, v) = a \cos v - \frac{ub \cos a \cos v}{\sqrt{a^2 \sin^2 v + b^2 \cos^2 v}},$$

$$y = y(u, v) = b \sin v - \frac{ub \cos a \sin v}{\sqrt{a^2 \sin^2 v + b^2 \cos^2 v}},$$

$$z = z(u) = u \sin a. \quad (2)$$

Ранее оболочки одинакового ската с эллипсом в основании уже привлекали внимание исследователей как с геометрической [1; 15–18], так и с прочностной точек зрения [1; 14; 19; 20]. Это показывает, что рассматриваемые оболочки могут найти применение в строительстве, архитектуре или в машиностроении.

#### 4. Исследование напряженно-деформированного состояния оболочки одинакового ската МКЭ и ВРМ

Исследуем напряженно-деформированное состояние оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом в основании со следующими геометрическими параметрами эллипса:  $a = 3$  м,

$b = 2$  м. Угол наклона прямолинейных направляющих  $\alpha = 60^\circ$ , длина прямолинейных направляющих  $u = 2$  м [14], толщина оболочки  $\delta = 5$  см, материал – сталь, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Конструкция рассчитывается на восприятие только статического равномерно-распределенного собственного веса.

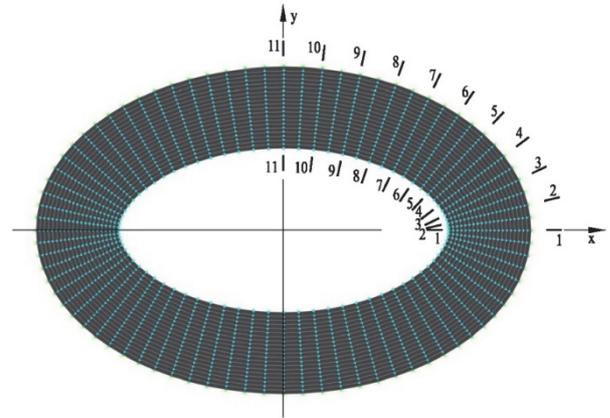


Рис. 2. Сечения для сравнения результатов МКЭ и ВРМ  
[Figure 2. Cross sections for comparison of FEM and VDM results]

Первый расчет выполняется в вычислительном комплексе SCAD Office, представляющем интегрированную систему прочностного анализа и проектирования конструкций на основе метода конечных элементов. Вид расчетной модели при аппроксимации срединной поверхности совокупностью четырехугольных и треугольных плоских элементов показан на рис. 1. Максимальное расстояние между узлами конечных элементов 0,235 м. Количество элементов – 1600, узлов – 1680.

Второй расчет выполняется в программе SHELLVRM, написанной на основе вариационно-разностного метода и состоящей из управляющей программы и 5 подпрограмм. В управляющей программе вводятся исходные данные, определяются размеры рабочих массивов и происходит обращение к подпрограммам. Подпрограмма SHESF формирует матрицу жесткости, подпрограмма SHLOAD организует ввод нагрузок и формирует правую часть системы уравнений, подпрограмма DSLT решает систему алгебраических уравнений ленточного типа, подпрограмма SHSORT организует реорганизацию перемещений с учетом граничных условий и подготавливает массив для расчета деформаций и внутренних усилий, в подпрограмме SHRES рассчитываются деформации, внутренние усилия и организуется вывод результатов. Расчетная сетка аналогична сетке в МКЭ.

Сравнение полученных результатов методом конечных элементов и вариационно-разностным методом выполняется по 11 сечениям (рис. 2),

в статье представлены результаты в виде таблиц для сечений 1–1 (табл. 1), 3–3 (табл. 2), 5–5 (табл. 3), 7–7 (табл. 4), 9–9 (табл. 5), 11–11 (табл. 6), для сечений 2–2, 4–4, 6–6, 8–8, 10–10 представлены вы-

борочные результаты в виде эпюр (рис. 3–7), также приводятся поля распределения нормальных напряжений и изгибающих моментов из вычислительного комплекса SCAD Office (рис. 8–9).

Таблица 1

Численные результаты расчетов – сечение 1–1  
[Table 1. Numerical results of calculations – section 1–1]

Координата срединной поверх- ности оболочки по оси $U$ (м) [Coordinates of the middle surface of the shell along the $U$ -axis (m)]	$N_v$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_v$ ВРМ (кН/м) [VDM (kN/m)]	$N_u$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_u$ ВРМ (кН/м) [VDM (kN/m)]	$M_v$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_v$ ВРМ (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]	$M_u$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_u$ ВРМ (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]
0,000	-3,2365	-3,2962	-10,7885	-10,9872	6,1712	6,2853	20,5706	20,9542
0,200	-3,2155	-3,2147	-10,2200	-10,2122	-0,1415	-0,0726	4,6682	4,7274
0,400	-2,7115	-2,7311	-9,2780	-9,2744	-2,9337	-2,8380	-0,9024	-0,7987
0,600	-2,3045	-2,3348	-8,2500	-8,2453	-3,8115	-3,6532	-1,6332	-1,5853
0,800	-2,0140	-2,0503	-7,1575	-7,1554	-4,4339	-4,1379	-1,5809	-1,5255
1,000	-1,7770	-1,8207	-6,0060	-6,0076	-5,6731	-5,1532	-2,0134	-1,8776
1,200	-1,5625	-1,6187	-4,7965	-4,8049	-7,9972	-7,1485	-3,1254	-2,8596
1,400	-1,3695	-1,4431	-3,5420	-3,5581	-11,8114	-10,4869	-5,0523	-4,5695
1,600	-1,2400	-1,3214	-2,2800	-2,2995	-17,5136	-15,5292	-7,9335	-7,0916
1,800	-1,2825	-1,3342	-1,0915	-1,1036	-24,8724	-22,2000	-9,6594	-8,8378
2,000	-0,8245	-0,9791	-0,1985	-0,0322	-33,5112	-29,7537	1,8510	0,0759

Таблица 2

Численные результаты расчетов – сечение 3–3  
[Table 2. Numerical results of calculations – section 3–3]

Координата срединной поверх- ности оболочки по оси $U$ (м) [Coordinates of the middle surface of the shell along the $U$ -axis (m)]	$N_v$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_v$ ВРМ (кН/м) [VDM (kN/m)]	$N_u$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_u$ ВРМ (кН/м) [VDM (kN/m)]	$M_v$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_v$ ВРМ (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]	$M_u$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_u$ ВРМ (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]
0,000	-2,9650	-3,0352	-9,8825	-10,1141	2,0433	2,0434	6,8110	6,8121
0,200	-3,2225	-3,2363	-9,3590	-9,3784	0,2817	0,3520	4,7915	4,8805
0,400	-3,1500	-3,1686	-8,4920	-8,5082	-2,4946	-2,4594	1,5497	1,5863
0,600	-2,9485	-2,9656	-7,5270	-7,5390	-4,9726	-4,9482	-0,9186	-0,9457
0,800	-2,7020	-2,7154	-6,5010	-6,5099	-6,8915	-6,8356	-2,4354	-2,4623
1,000	-2,4490	-2,4613	-5,4380	-5,4446	-8,5050	-8,3915	-3,3194	-3,3109
1,200	-2,2050	-2,2180	-4,3505	-4,3556	-10,2395	-10,0454	-4,0085	-3,9534
1,400	-1,9760	-1,9895	-3,2445	-3,2471	-12,5282	-12,2135	-4,9523	-4,8138
1,600	-1,7880	-1,7923	-2,1300	-2,1298	-15,6879	-15,1859	-6,3502	-6,0822
1,800	-1,6840	-1,6618	-1,0360	-1,0271	-19,5379	-18,9137	-6,3678	-6,3902
2,000	-1,0700	-1,1301	-0,1790	0,0205	-23,4915	-23,2399	2,3406	-0,0492

Таблица 3

Численные результаты расчетов – сечение 5–5  
[Table 3. Numerical results of calculations – section 5–5]

Координата срединной поверх- ности оболочки по оси $U$ (м) [Coordinates of the middle surface of the shell along the $U$ -axis (m)]	$N_v$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_v$ ВРМ (кН/м) [VDM (kN/m)]	$N_u$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_u$ ВРМ (кН/м) [VDM (kN/m)]	$M_v$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_v$ ВРМ (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]	$M_u$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_u$ ВРМ (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]
0,000	-2,3385	-2,4191	-7,7945	-8,0684	-9,9630	-10,3201	-33,2101	-34,4135
0,200	-3,0175	-3,0656	-7,3825	-7,4536	0,0796	0,1123	-0,2808	-0,1756
0,400	-3,9255	-3,9701	-6,7330	-6,7875	1,2306	1,1792	8,4997	8,4503

Окончание табл. 3

Координата срединной поверх- ности оболочки по оси $U$ (м) [Coordinates of the middle surface of the shell along the $U$ -axis (m)]	$N_v$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_v$ BPM (кН/м) [VDM (kN/m)]	$N_u$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_u$ BPM (кН/м) [VDM (kN/m)]	$M_v$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_v$ BPM (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]	$M_u$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_u$ BPM (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]
0,600	-4,3840	-4,4174	-5,9860	-6,0341	-1,6618	-1,7923	5,7629	5,6486
0,800	-4,4020	-4,4282	-5,1735	-5,2160	-5,0150	-5,2140	0,8965	0,7887
1,000	-4,1860	-4,2085	-4,3305	-4,3664	-7,3595	-7,6400	-2,3648	-2,4525
1,200	-3,8975	-3,9181	-3,4810	-3,5090	-8,5274	-8,9291	-3,6117	-3,7092
1,400	-3,6120	-3,6287	-2,6310	-2,6516	-8,8174	-9,4048	-3,5497	-3,7170
1,600	-3,3445	-3,3560	-1,7705	-1,7844	-8,5330	-9,3999	-2,6921	-3,0823
1,800	-3,0410	-3,0627	-0,8910	-0,8938	-7,8912	-9,1841	-0,6767	-1,6971
2,000	-2,4645	-2,5418	-0,1790	0,0044	-7,3781	-9,2557	1,7156	-0,0089

Таблица 4

Численные результаты расчетов – сечение 7–7  
[Table 4. Numerical results of calculations – section 7–7]

Координата срединной поверх- ности оболочки по оси $U$ (м) [Coordinates of the middle surface of the shell along the $U$ -axis (m)]	$N_v$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_v$ BPM (кН/м) [VDM (kN/m)]	$N_u$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_u$ BPM (кН/м) [VDM (kN/m)]	$M_v$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_v$ BPM (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]	$M_u$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_u$ BPM (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]
0,000	-1,7255	-1,7923	-5,7520	-5,9733	-26,6859	-27,6348	-88,5929	-92,1159
0,200	-2,5595	-2,6242	-5,4670	-5,5534	-3,2352	-3,3089	-16,3604	-16,4906
0,400	-4,3880	-4,4528	-5,0790	-5,1385	6,1452	6,0459	14,0328	13,8517
0,600	-5,7535	-5,8105	-4,6155	-4,6637	6,9748	6,8533	18,2650	18,1289
0,800	-6,3545	-6,4030	-4,0865	-4,1300	4,6782	4,5263	12,6330	12,5666
1,000	-6,3905	-6,4324	-3,5085	-3,5483	2,3227	2,1258	6,2603	6,2470
1,200	-6,1440	-6,1793	-2,8940	-2,9273	1,0163	0,7490	2,3885	2,3672
1,400	-5,8115	-5,8389	-2,2460	-2,2730	0,7689	0,3888	1,0796	0,9243
1,600	-5,4820	-5,5054	-1,5590	-1,5784	1,1785	0,6191	1,3079	0,7899
1,800	-5,1740	-5,2209	-0,8170	-0,8294	1,8038	0,9908	1,9206	0,7616
2,000	-4,9795	-5,0502	-0,2140	-0,0039	2,1826	1,3126	1,2296	0,0007

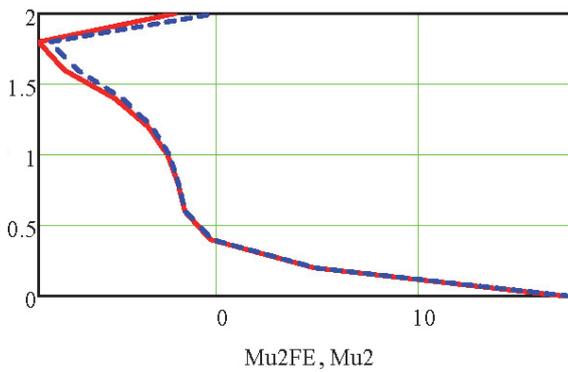
Таблица 5

Численные результаты расчетов – сечение 9–9  
[Table 5. Numerical results of calculations – section 9–9]

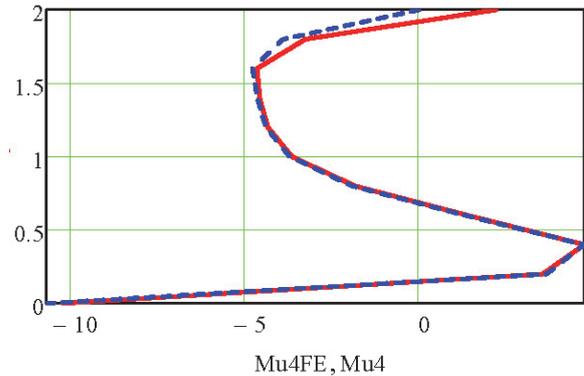
Координата срединной поверх- ности оболочки по оси $U$ (м) [Coordinates of the middle surface of the shell along the $U$ -axis (m)]	$N_v$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_v$ BPM (кН/м) [VDM (kN/m)]	$N_u$ МКЭ (кН/м) [FEM (kN/m)]	$N_u$ BPM (кН/м) [VDM (kN/m)]	$M_v$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_v$ BPM (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]	$M_u$ МКЭ (Н·м/м) [FEM (N·m/m)]	$M_u$ BPM (Н·м/м) [VDM (N·m/m)]
0,000	-1,3600	-1,4009	-4,5335	-4,6696	-40,9204	-42,4381	-136,4013	-141,4602
0,200	-2,1680	-2,2298	-4,3335	-4,3949	-8,1522	-8,3395	-35,4499	-35,9733
0,400	-4,5375	-4,6078	-4,1190	-4,1496	8,2662	8,1600	14,3722	13,9989
0,600	-6,6085	-6,6786	-3,8400	-3,8593	13,3517	13,3318	28,2120	28,0468
0,800	-7,8020	-7,8686	-3,4990	-3,5169	13,0467	13,1062	24,9814	24,9959
1,000	-8,2005	-8,2630	-3,0980	-3,1176	11,2335	11,3404	17,1469	17,2656
1,200	-8,1020	-8,1570	-2,6370	-2,6575	9,7411	9,8689	10,5854	10,6929
1,400	-7,7830	-7,8313	-2,1095	-2,1298	9,0203	9,1164	6,6897	6,6178
1,600	-7,4295	-7,4791	-1,5045	-1,5235	8,8630	8,8731	4,6470	4,1516
1,800	-7,1650	-7,2417	-0,8040	-0,8218	8,9442	8,8300	3,1393	2,0022
2,000	-7,1840	-7,2771	-0,2335	-0,0055	9,0038	9,0576	0,9647	0,0036

**Численные результаты расчетов – сечение 11–11**  
**[Table 6. Numerical results of calculations – section 11–11]**

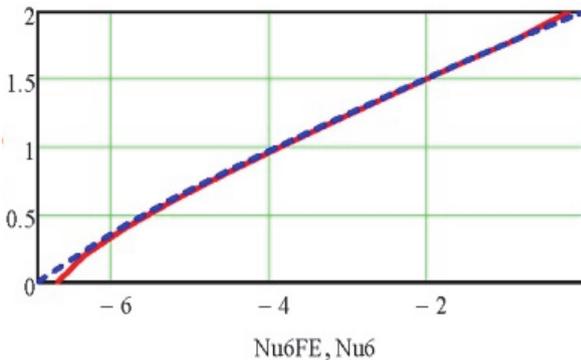
Координата срединной поверх- ности оболочки по оси $U$ (м) [Coordinates of the middle surface of the shell along the $U$ -axis (m)]	$Ny$ МКЭ	$Ny$ ВРМ	$Nu$ МКЭ	$Nu$ ВРМ	$Mv$ МКЭ	$Mv$ ВРМ	$Mu$ МКЭ	$Mu$ ВРМ
	(кН/м)	(кН/м)	(кН/м)	(кН/м)	(Н·м/м)	(Н·м/м)	(Н·м/м)	(Н·м/м)
	[FEM (kN/m)]	[VDM (kN/m)]	[FEM (kN/m)]	[VDM (kN/m)]	[FEM (N·m/m)]	[VDM (N·m/m)]	[FEM (N·m/m)]	[VDM (N·m/m)]
0,000	-1,2495	-1,2782	-4,1645	-4,2615	-46,3761	-48,1181	-154,5870	-160,3935
0,200	-2,0310	-2,0866	-3,9910	-4,0358	-10,4431	-10,6831	-43,7826	-44,4982
0,400	-4,5665	-4,6323	-3,8300	-3,8426	8,5468	8,4337	13,4742	13,0081
0,600	-6,8890	-6,9563	-3,6060	-3,6081	15,3333	15,3527	31,5612	31,3724
0,800	-8,3200	-8,3856	-3,3200	-3,3217	15,9322	16,0786	29,8679	29,9009
1,000	-8,8860	-8,9457	-2,9720	-2,9783	14,4501	14,6758	21,8237	21,9940
1,200	-8,8725	-8,9242	-2,5580	-2,5673	12,9670	13,2337	14,2560	14,4207
1,400	-8,5780	-8,6230	-2,0680	-2,0797	12,1247	12,3802	9,1828	9,1390
1,600	-8,2250	-8,2708	-1,4880	-1,5019	11,8268	12,0074	6,0593	5,5672
1,800	-7,9725	-8,0491	-0,7995	-0,8139	11,8121	11,8799	3,6652	2,5182
2,000	-8,0460	-8,1384	-0,2375	-0,0004	11,8271	12,1448	0,7421	0,0040



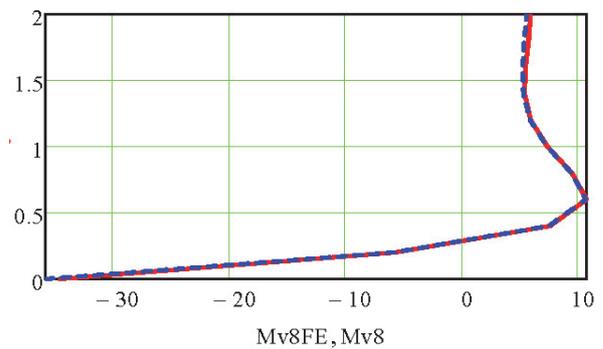
**Рис. 3.** Сравнение изгибающих моментов  $Mu$  (Н·м/м) в сечении 2–2:  
 МКЭ – сплошная линия; ВРМ – пунктирная линия  
**[Figure 3.** Comparison of bending moments  $Mu$  (N·m/m) in section 2–2:  
 FEM – solid line; VDM – dotted line]



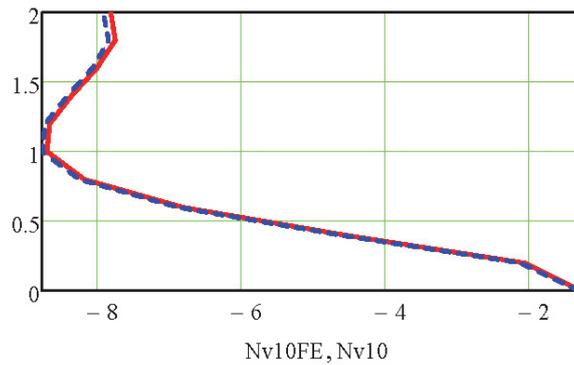
**Рис. 4.** Сравнение изгибающих моментов  $Mu$  (Н·м/м) в сечении 4–4:  
 МКЭ – сплошная линия; ВРМ – пунктирная линия  
**[Figure 4.** Comparison of bending moments  $Mu$  (N·m/m) in section 4–4:  
 FEM – solid line; VDM – dotted line]



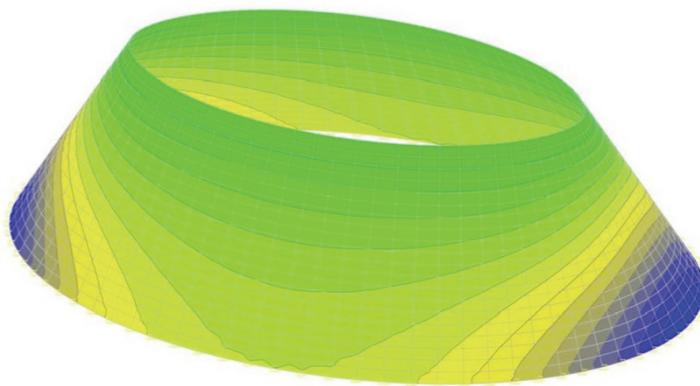
**Рис. 5.** Сравнение нормальных сил  $Nu$  (кН/м) в сечении 6–6:  
 МКЭ – сплошная линия; ВРМ – пунктирная линия  
**[Figure 5.** Comparison of normal forces  $Nu$  (kN/m) in section 6–6:  
 FEM – solid line; VDM – dotted line]



**Рис. 6.** Сравнение изгибающих моментов  $Mv$  (Н·м/м) в сечении 8–8:  
 МКЭ – сплошная линия; ВРМ – пунктирная линия  
**[Figure 6.** Comparison of bending moments  $Mv$  (N·m/m) in section 8–8:  
 FEM – solid line; VDM – dotted line]

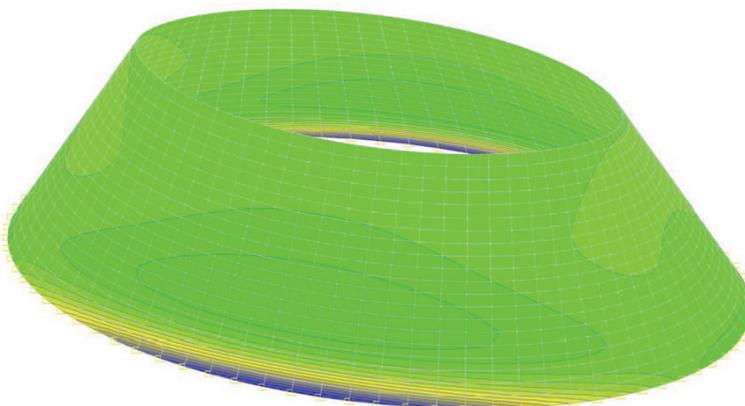


**Рис. 7.** Сравнение нормальных сил  $Nv$  (кН/м) в сечении 10–10:  
 МКЭ – сплошная линия; ВРМ – пунктирная линия  
**[Figure 7.** Comparison of normal forces  $Nv$  (kN/m) in section 10–10:  
 FEM – solid line; VDM – dotted line]



-216,16	-202,87
-202,87	-189,57
-189,57	-176,28
-176,28	-162,98
-162,98	-149,69
-149,69	-136,39
-136,39	-123,1
-123,1	-109,8
-109,8	-96,51
-96,51	-83,21
-83,21	-69,92
-69,92	-56,62
-56,62	-43,33
-43,33	-30,03
-30,03	-16,74
-16,74	-3,44

**Рис. 8.** Нормальное напряжение  $Nu$  (кН/м<sup>2</sup>) вдоль прямолинейных направляющих  
**[Figure 8.** Normal stress  $Nu$  along the linear coordinates  $U$  of the surface (kN/m<sup>2</sup>)]



-154,587	-142,914
-142,914	-131,2409
-131,2409	-119,5678
-119,5678	-107,8947
-107,8947	-96,2217
-96,2217	-84,5486
-84,5486	-72,8755
-72,8755	-61,2025
-61,2025	-49,5294
-49,5294	-37,8563
-37,8563	-26,1832
-26,1832	-14,5102
-14,5102	-2,8371
-2,8371	8,836
8,836	20,509
20,509	32,1821

**Рис. 9.** Изгибающий момент  $Mu$  (кН·м/м) вдоль прямолинейных направляющих  
**[Figure 9.** Bending moment  $Mu$  along the linear coordinates  $U$  of the surface (kN·m/m)]

Сравнение результатов расчетов методом конечных элементов и вариационно-разностным методом показывает хорошее сходжение.

Отклонения результатов в исследуемых узлах составляют от 1 до 10 %, только в узлах с коор-

динатами 1,6, 1,8 и 2,0 м по прямолинейным направляющим  $U$  расхождения доходят до 100 % в нормальных силах  $Nu$ , изгибающих моментах  $Mu$  и  $Mv$ . При значении прямолинейных направляющих  $U = 0$  м закрепление эллипса в основании

жесткое (заделка), при значении прямолинейных направляющих  $U = 2$  м – свободный край, следовательно, в данном направлении (направлении прямолинейных направляющих  $U$ ) торсовая оболочка работает как консоль. Из сопротивления материалов известно, что значение изгибающего момента от равномерно-распределенной нагрузки на конце консоли равно нулю, таким образом, результаты, полученные при решении вариационно-разностным методом для изгибающего момента  $M_i$  в узлах оболочки с координатами 1,6, 1,8 и 2,0 м по прямолинейным направляющим  $U$ , точнее. Также значения результатов нормальных сил  $N_i$  в узлах оболочки с координатами 2,0 м по прямолинейным направляющим  $U$  являются более точными.

Значения нормальных напряжений вдоль прямолинейных и криволинейных направляющих оболочки свидетельствует о том, что данная оболочка одинакового ската с направляющим эллипсом в основании работает на сжатие. Таким образом, оболочки данного класса могут изготавливаться из большого ряда строительных материалов, что является безусловно большим плюсом при выборе из разных видов оболочек.

### Заключение

Благодаря результатам, полученным при исследовании напряженно-деформированного состояния торсовой оболочки одинакового ската с эллипсом в основании можно резюмировать, что данный вид оболочек достоин внимания архитекторов. Следует отметить возможность изготовления данной оболочки из листового материала, благодаря способности разворачиваться на плоскость без складок и разрывов, таким образом, выполнение опалубки при возведении таких оболочек из монолитного железобетона не вызовет больших сложностей [1].

Сравнение результатов, полученных методом конечных элементов и вариационно-разностным методом, показывает плюсы и недочеты каждого из методов. Использование вычислительного комплекса SCAD Office на базе МКЭ является более универсальным по сравнению с ВРМ для решения сложных пространственных конструкций и сооружений. Однако полученные результаты в некоторых узлах оболочки являются более корректными и правильными при решении ВРМ. Для разъяснения данного вопроса авторы готовят письмо в редакцию SCAD Office. Также О.О. Алёшина работает над получением аналитического решения для вычисления НДС оболочек одинакового ската с эллипсом в основании. После нахождения

аналитического решения будет выполнено сравнение напряженно-деформированного состояния данной оболочки тремя разными методами решения.

### Список литературы

1. *Кривошапко С.Н.* Геометрия линейчатых поверхностей с ребром возврата и линейная теория расчета торсовых оболочек: монография. М.: РУДН, 2009. 357 с.
2. *Иванов В.Н.* Основы численных методов расчета конструкций: конспект лекций. М.: Изд-во РУДН, 2007. 64 с.
3. *Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamiyeva I.A.* Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. 2014. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 95–108.
4. *Кривошапко С.Н., Пятикрестовский К.П.* Из истории строительства деревянных оболочек и их возможности в настоящем и будущем // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 1. С. 3–18.
5. *Krivoshapko S.N.* The perspectives of application of thin-walled plastic and composite polymer shells in civil and industrial architecture // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2018. Vol. 37. Iss. 4. Pp. 217–229. DOI: 10.1177/0731684417740770
6. *Иванов В.Н., Романова В.А.* Конструкционные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCAD, AutoCAD. М.: АСВ, 2016. 412 с.
7. *Cajamarca-Zúñiga, D., Alyoshina, O.* Análisis estructural numérico del modelo a escala 1:10 del cascarón no-canónico “Yasuni” generado sobre la base de la arquitectura biónica // Killkana Tecnica. 2019. Vol. 3. No. 1. Pp. 7–12. DOI: 10.26871/killkana\_tecnica.v3i1.414. URL: [http://killkana.ucacue.edu.ec/index.php/killkana\\_tecnico/article/view/414](http://killkana.ucacue.edu.ec/index.php/killkana_tecnico/article/view/414)
8. *Аганов В.П.* Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций. М.: АСВ, 2004. 248 с.
9. *Иванов В.Н.* Основы метода конечных элементов и вариационно-разностного метода: учебное пособие. М.: РУДН, 2008. 168 с.
10. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++ / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, С.Ю. Фиалко. М.: СКАД СОФТ, 2015. 848 с.
11. *Шмельтер Я., Дацко М., Добровичинский С., Вечорек М.* Метод конечных элементов в статике сооружений / пер. с пол. М.В. Предтеченского; под ред. В.Н. Сидорова. М.: Стройиздат, 1986. 220 с.
12. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 4-е изд., перераб. М.: СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
13. *Иванов В.Н.* Вариационно-разностный метод и метод глобальных элементов в расчете сопряжений отсеков оболочек // Строительная механика инженер-

ных конструкций и сооружений: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 12. М.: АСВ, 2003. С. 34–41.

14. Алёшина О.О. Исследования по геометрии и расчету торсовых оболочек одинакового ската // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 3. С. 63–70.

15. Кривошапко С.Н., Крутов А.В. Ребра возврата, линии раздела и самопересечения некоторых технологических поверхностей откоса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2001. № 1. С. 98–104.

16. Романова В.А., Тхома А. Автоматическое моделирование поверхностей одинакового ската в системе AutoCAD посредством языка AutoLISP // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 5. С. 5–11.

17. Romanova V.A., Rynkovskaya M., Ivanov V. Automatic modeling of surfaces with identical slopes // *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol. 92. Pp. 143–156.

18. Карташев А.И. Поверхности одинакового ската: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Л.: Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1954.

19. Кривошапко С.Н., Тимошин М.А. Статический расчет торсовой оболочки одинакового ската с направляющим эллипсом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 1. С. 3–10.

20. Тимошин М.А. Численные результаты статического расчета на прочность и устойчивость трех оболочек нулевой гауссовой кривизны с направляющим эллипсом // Инженерные системы – 2008: труды Всероссийской научно-практической конференции (Москва, 7–11 апреля 2008 г.). М.: РУДН, 2008. С. 209–212.

RESEARCH PAPER

## Comparative analysis of the results of determining the parameters of the stress-strain state of equal slope shell

Vyacheslav N. Ivanov, Olga O. Alyoshina \*

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

\*xiaofeng@yandex.ru

### Article history:

Received: May 02, 2019

Revised: August 15, 2019

Accepted: September 12, 2019

### Abstract

**Relevance.** Thin-walled structures of shells constitute a large class in architecture, in civil and industrial construction, mechanical engineering and instrument making, aircraft, rocket and shipbuilding, etc. Each surface has certain advantages over the other. So the torso surface can be deployed on the plane of all its points without folds and breaks, with the length of the curves and the angles between any curves belonging to the surface, do not change. The investigation of the stress-strain state of the equal slope shell with a director ellipse at the base is presented to date in a small volume. **The aim of the work.** Obtaining data for comparative analysis of the results of the stress-strain state of equal slope shells by the finite element method and the variational-difference method. **Methods.** To assess the stress-strain state of the equal slope shell, the SCAD Office computer complex based on the finite element method and the “PLATEVRM” program, written on the basis of the variational-difference method, are used. **Results.** The numerical results of the stress-strain state of the equal slope shell are obtained and analyzed, the pros and cons of the results of calculations by the finite element method and the variational-difference method are revealed.

**Keywords:** theory of thin shells; torso shell; equal slope shell; geometric modeling; computational complex “SCAD Office”; finite element method; variational-difference method

### For citation

Ivanov V.N., Alyoshina O.O. (2019). Comparative analysis of the results of determining the parameters of the stress-strain state of equal slope shell. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 374–383. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-374-383>. (In Russ.)

### References

1. Krivoshapko S.N. (2009). *Geometry of Ruled Surfaces with Cuspidal Edge and Linear Theory of Analysis*

*of Tangential Developable Shells: Monograph*. Moscow: RUDN Publ. (In Russ.)

2. Ivanov V.N. (2007). *The Basis of Numerical Methods of Analysis of Structures*. Moscow: RUDN Publ. (In Russ.)

3. Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamiya I.A. (2014). Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 18(2), 95–108.

**Olga O. Alyoshina**, Engineer, Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Engineering Academy. eLIBRARY SPIN-code: 8550-4986.

**Vyacheslav N. Ivanov**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy. ORCID iD: 0000-0003-4023-156X. eLIBRARY SPIN-code: 3110-9909.

4. Krivoshapko S.N., Pyatikrestovskiy K.P. (2014). On history of building of wooden shells and their opportunities at present and in the future. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (1), 3–18. (In Russ.)
5. Krivoshapko S.N. (2018). The perspectives of application of thin-walled plastic and composite polymer shells in civil and industrial architecture. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(4), 217–229. DOI: 10.1177/0731684417740770
6. Ivanov V.N., Romanova V.A. (2016). *Konstruksionnye formy prostranstvennykh konstruksiy (vizualizatsiya poverkhnostey v sistemakh MathCAD, AutoCAD)* [Constructive Forms of Spatial Structures (Visualization of Surfaces in MathCAD, AutoCAD)]. Moscow, ASV Publ. (In Russ.)
7. Cajamarca-Zúñiga D., Alyoshina O. (2019). Análisis estructural numérico del modelo a escala 1:10 del cascarón no-canónico “Yasuni” generado sobre la base de la arquitectura biónica. *Killkana Tecnica*, 3(1), 7–12. DOI: 10.26871/killkana\_tecnica.v3i1.414. [http://killkana.ucacue.edu.ec/index.php/killkana\\_tecnico/article/view/414](http://killkana.ucacue.edu.ec/index.php/killkana_tecnico/article/view/414)
8. Agapov V.P. (2004). *Finite Element Method in Statics, Dynamics, and Stability of Structures*. Moscow: ASV Publ. (In Russ.)
9. Ivanov V.N. (2008). *The Basis of Finite Element Method and Variational-Difference Energy Method*. Moscow: RUDN Publ. (In Russ.)
10. Karpilovskyy V.S., Kryksunov E.Z., Maliarenko A.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A., Fialko S.Y. (2015). *SCAD Office. V. 21. System Scad++*. Moscow, SCAD Office Publ.
11. Szmelter J., Dacko M., Dobrocinski S., Wiczo-rek M. (1986). *Metoda elementow skonczonych w statyce konstrukcyj [FEM in Statics of Buildings]*. Moscow: Stroyizdat Publ. (In Russ.)
12. Perelmuter A.V., Slivker V.I. (2011). *Raschetnie modeli sooruzheniy i vozmozhnost ih analiza [Calculation models of structures and possibility of their analysis]*. Moscow: SCAD SOFT Publ. (In Russ.)
13. Ivanov V.N. (2003). Variational-difference method and global elements in the calculation of the mates of the compartments of the shells. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (12), 34–41. (In Russ.)
14. Alyoshina O.O. (2019). Investigation of the geometry and calculation of equal slope shells. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (3), 63–70. (In Russ.)
15. Krivoshapko S.N., Krutov A.V. (2001). Cuspidal edges, lines of division and self-intersection of some technological surfaces of slope. *RUDN Journal of Engineering Researches*, (1), 98–104. (In Russ.)
16. Romanova V.A., Thoma Anamariya. (2017). Automatic modeling of the surfaces of the equal slope in AutoCAD system through language AutoLISP. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (5), 5–11. (In Russ.)
17. Romanova V.A., Rynkovskaya M., Ivanov V. (2019). Automatic modeling of surfaces with identical slopes. *Advanced Structured Materials*, 92, 143–156.
18. Kartashev A.I. (1954). *Equal Slope Surfaces* (Dissertation Abstract of Candidate of Technical Sciences). Leningrad: LIIZhT Publ. (In Russ.)
19. Krivoshapko S.N., Timoshin M.A. (2008). Static analysis of a torse shell of equal slope with a director ellipse. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (1), 3–10. (In Russ.)
20. Timoshin M.A. (2008). Numerical results of the strength and buckling static analysis three shells of zero gauss curvature with a director ellipse. *Injenernie Systemi – 2008: trudi Vseross. nauchno-pract. conf. (Moscow, April 7–11, 2008)* (pp. 209–212). Moscow: RUDN Publ. (In Russ.)

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ  
DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGSDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391  
УДК 621.039:539.4.013:620.19

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов

Д.А. Кузьмин, А.В. Андрееenkova\*

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Российская Федерация, 109507, Москва, ул. Ферганская, 25

\*Andreenkova26@list.ru

## История статьи:

Поступила в редакцию: 05 августа 2019 г.

Доработана: 01 октября 2019 г.

Принята к публикации: 03 октября 2019 г.

## Аннотация

**Актуальность.** На АЭС содержится большое количество оборудования и трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу. В результате сочетания различных параметров – типоразмеров (диаметры, толщина стенок), эксплуатационных параметров (внутреннее давление, температура), марок сталей и типов элементов – количество расчетных случаев составляет десятки тысяч, не считая возможных форм утонений. В процессе технического обслуживания и ремонта на станциях проводят оценку соответствия фактических и допускаемых значений толщины стенок. Для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов введены поправочные функции к нормативным зависимостям, учитывающие форму утонения, для определения допустимых утонений. **Цель.** Поставлена задача определить влияние форм локальных утонений на напряженно-деформированное состояние и критическое утонение для прямолинейных участков трубопроводов, подверженных механизму эрозионно-коррозионного износа с учетом аварийных режимов. **Методы.** Для определения допускаемых значений коэффициентов концентрации напряжений трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу, были использованы требования федеральных норм и правил с учетом аварийных режимов эксплуатации. Для исследования коэффициентов концентрации напряжений использовался метод конечных элементов и аналитические методы для различных форм, размеров и глубин утонений. **Результаты.** Разработан метод, который позволяет получить допускаемые значения коэффициентов концентрации напряжений для аварийных режимов эксплуатации, что позволяет определить допускаемую глубину утонения в аварийных режимах – критерий сверху. Проведены исследования по определению коэффициентов концентрации напряжений при локальном утонении для различных форм этих утонений. Определены зависимости коэффициентов концентрации от геометрических параметров локального утонения при заданной толщине стенки для прямолинейного участка трубопровода. В результате исследований построены зависимости глубины утонений от коэффициентов концентраций для прямолинейных участков трубопроводов, получена мастер-кривая. Проведенные исследования учитывают нагрузку от внутреннего давления и изгибающего момента.

**Ключевые слова:** трубопроводы; эрозионно-коррозионный износ; объемное утонение; коэффициент концентрации напряжений; прочность

## Для цитирования

Кузьмин Д.А., Андрееenkova А.В. Исследование закономерностей напряженно-деформированного состояния при локальном утонении в прямолинейных участках трубопроводов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 384–391. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391>

Кузьмин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела надежности.

Андрееenkova Анастасия Валерьевна, магистр, инженер 1 категории.

© Кузьмин Д.А., Андрееenkova А.В., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Введение

Локальный износ металла – распространенный вид повреждения на оборудовании и трубопроводах. Основным механизмом этого повреждения является эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ). Этому процессу подвержены практически все элементы конденсатно-питательного и парового трактов турбоустановок АЭС и ТЭС. Другие виды износа металла в большинстве случаев протекают совместно с этим процессом, как показано в научных трудах [1–5]. Сосуды давления и трубопроводные системы ядерных энергетических установок относятся к категории критически важных элементов, в значительной степени определяющих их ресурс, надежность, живучесть и безопасность эксплуатации. Для обеспечения техногенной безопасности АЭС используют современные технологии, позволяющие разработать и внедрить разнообразные системы безопасности [6].

Повреждение металла в процессе ЭКИ приводит к специфическим объемным формам износа – утонениям [7]. Утонения влекут возникновение концентрации напряжений в элементах конструкций [8–11]. Для обеспечения прочности и прогнозирования ресурса оборудования и трубопроводов, подверженных ЭКИ, необходимо исследовать напряжения в зоне локальных утонений в зависимости от геометрических параметров, а также уточнить механизм коррозионного воздействия, влияющего на форму и протяженность локального утонения [12–16].

Концентратор напряжений ( $\alpha_\sigma$ ) [17] – это отношение максимальных напряжений ( $\sigma_{\max}$ ) в зоне локального утонения к номинальным напряжениям ( $\sigma_{\text{ном}}$ ) в той же зоне без повреждений элементов оборудования или трубопровода:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}} \quad (1)$$

В ходе исследования было рассмотрено влияние различных форм утонения на напряженно-деформированное состояние, а также определено критическое утонение для прямолинейных участков трубопроводов, подверженных механизму ЭКИ с учетом аварийных режимов.

## 1. Методы исследований

### Расчет концентратора напряжений при локальном сферическом утонении

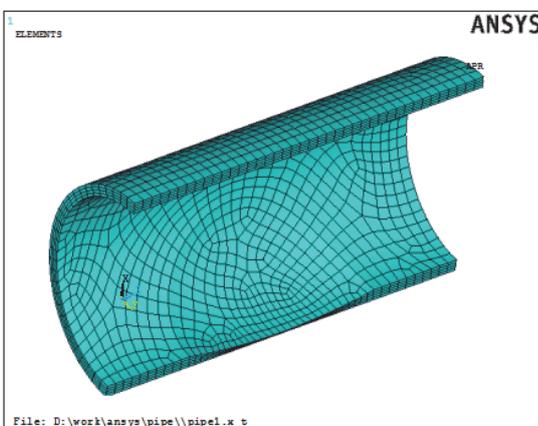
Для расчетов была взята цилиндрическая оболочка с внешним диаметром ( $D$ ) 530 мм, толщиной ( $s$ ) 28 мм. Расчетные модели были построены в программном комплексе ANSYS Mechanical (лицензия № 662207 от 21.03.2012). Для построения модели использовался трехмерный элемент объемного напряженно-деформированного состояния с 20 узлами – SOLID186.

Исходные данные независимо друг от друга варьировались в следующих диапазонах:

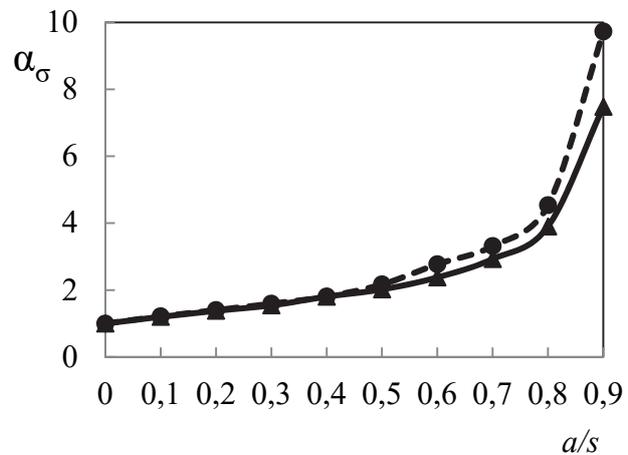
– относительная глубина утонения ( $a/s$ ) – изменялась в диапазоне от  $0,1s$  до  $0,9s$  с шагом  $0,1s$ , где  $a$  – глубина утонения;

– утонение моделировалось как часть усеченной сферы, протяженность утонения –  $L$  с протяженностью, кратной внешнему диаметру  $D$  и  $0,5D$ .

Расчетная модель представлена на рис. 1, *а*. В результате расчетов получены значения коэффициента концентрации напряжений от относительного утонения цилиндрической оболочки. На рис. 1, *б* представлены графики зависимости коэффициента концентрации напряжений от относительного утонения трубопровода, где кривая 1 соответствует утонению с протяженностью  $D$ , а кривая 2 –  $0,5D$ .



*а*



*б*

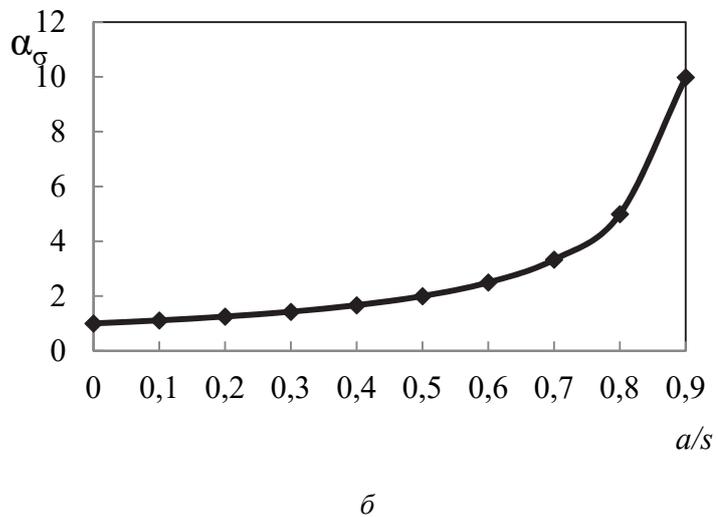
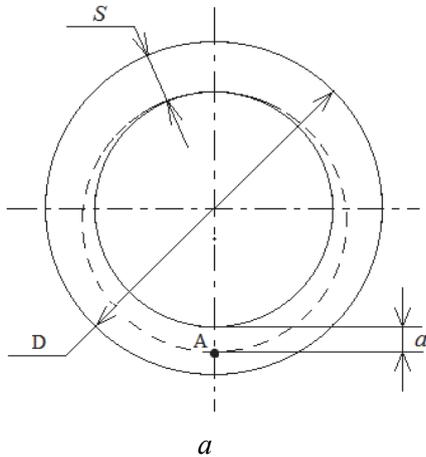
Рис. 1. Расчетная модель (*а*) и значения коэффициента концентрации напряжений от величины сферического утонения (*б*)  
[Figure 1. Calculation model (*а*) and value of stress concentration coefficient of spherical thinning value (*б*)]

**Расчет концентратора напряжений при обширном локальном утонении**

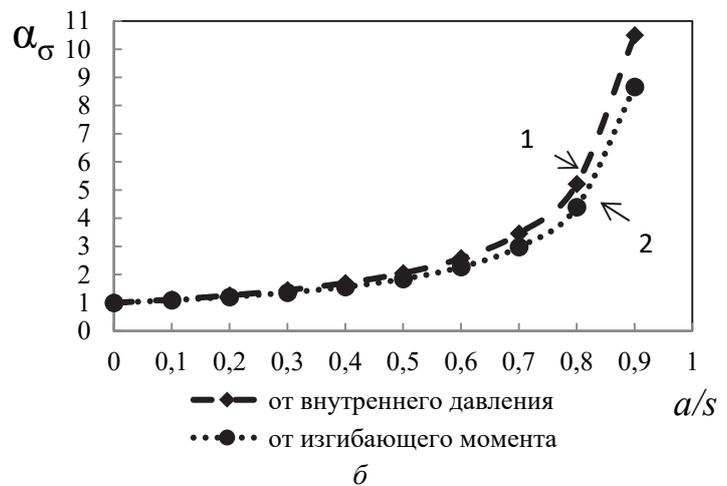
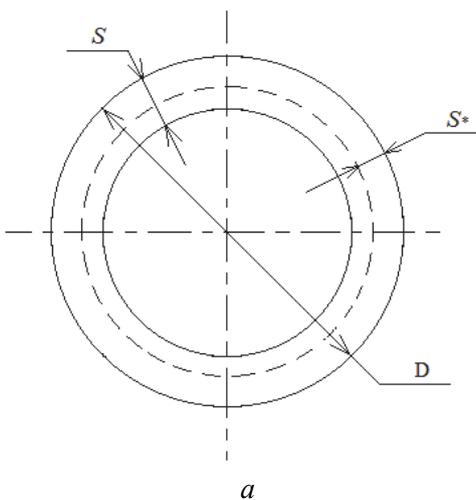
Для расчета напряжений при обширном локальном утонении использовалась модифицированная аналитическая формула [18], которая позволяет точно определить мембранные напряжения в максимально утоненном месте (А):

$$\sigma = p \left( \frac{2R^2 \left[ R^2 + \left( R - s + \frac{a}{2} \right)^2 - 2 \frac{a}{2} \left( R - s + \frac{a}{2} \right) - \frac{a^2}{2} \right]}{\left[ \left( R - s + \frac{a}{2} \right)^2 + R^2 \right] \left[ R^2 - \left( R - s + \frac{a}{2} \right)^2 - 2 \frac{a}{2} \left( R - s + \frac{a}{2} \right) - \frac{a^2}{2} \right]} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $R$  – наружный радиус цилиндрической оболочки;  $s$  – толщина стенки трубопровода;  $a$  – глубина утонения,  $p$  – внутреннее давление.



**Рис. 2.** Расчетная схема (а) и значения коэффициента концентрации напряжений от величины обширного утонения (б)  
 [Figure 2. Settlement scheme (a) and value of stress concentration coefficient of extensive thinning value (b)]



**Рис. 3.** Расчетная схема (а) и величины коэффициента концентрации напряжений при равномерном утонении (б)  
 [Figure 3. Settlement scheme (a) and value of stress concentration coefficient with even thinning (b)]

При расчете максимальных напряжений в зоне локального утонения толщина стенки равна  $s - a$ , где  $a$  – глубина утонения.

Напряжения от изгибающего момента:

$$\sigma_M = \frac{M}{W}, \quad (4)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $W$  – момент сопротивления.

Используя формулы (1), (3) и (4) можно определить коэффициент концентрации напряжений при действии на трубопровод внутреннего давления и изгибающего момента:

$$\alpha_\sigma = \frac{\frac{p(D-s+a)}{2(s-a)} + \frac{M}{W(a)}}{\frac{p(D-s)}{2s} + \frac{M}{W}}. \quad (5)$$

Расчетная схема показана на рис. 3, а, график зависимости представлен на рис. 3, б.

Скорость увеличения функции концентратора напряжений от внутреннего давления больше, чем от изгибающего момента. Если изгибающий момент равен нулю, то функция будет соответствовать кривой 1 (рис. 3, б), при внутреннем давлении, равном нулю, – кривой 2, при их комбинации функция будет лежать между этими двумя кривыми. Консервативно оценивать допускаемое утонение по кривой 1 – от внутреннего давления.

## 2. Обобщение результатов

На рис. 4 представлено обобщение результатов с формами утонений: сферическое, обширное и равномерное.

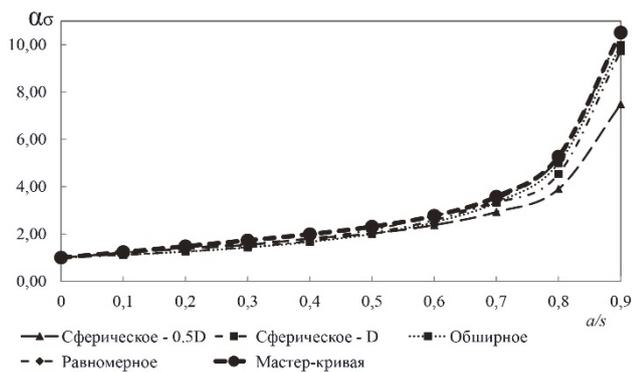


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента концентрации напряжений от относительного утонения трубопровода [Figure 4. Graphs of the stress concentration coefficient on the relative thinning of the pipeline]

При обобщении полученных результатов получена огибающая сверху кривая  $\alpha_\sigma^{\Sigma}$  (мастер-кривая), где за базовую функцию принята нормативная кривая при равномерном утонении, средняя погрешность 3,5 %:

$$\alpha_\sigma^{\Sigma} = \left[ \left( 1.2 - \frac{a}{s} \right) \frac{a}{s} \cos^3 \left( \frac{\pi a}{2s} \right) + 1 \right] \alpha_\sigma. \quad (6)$$

Множитель в формуле (6) консервативно учитывает влияние от различных форм утонений. Для оценки прочности трубопровода с утонением или для определения допускаемых толщин стенок в трубопроводах рекомендуется использовать

$$\sigma = \left[ \left( 1.2 - \frac{a}{s} \right) \frac{a}{s} \cos^3 \left( \frac{\pi a}{2s} \right) + 1 \right] \frac{p(D-s+a)}{2(s-a)}. \quad (7)$$

### Определение критических величин коэффициента концентрации напряжений и деформаций в локальной зоне

Для определения критических величин концентрации напряжений, воспользуемся критерием норм расчета на прочность [19]

$$(\sigma)_{RV} \text{ или } (\sigma)_{RK} \leq 2R_{p0,2}^T, \quad (8)$$

где  $(\sigma)_{RV}$  – размах приведенных напряжений в элементах оборудования, МПа;  $(\sigma)_{RK}$  – размах приведенных напряжений в элементах трубопроводов, МПа;  $R_{p0,2}^T$  – минимально гарантированное значение предела текучести при температуре эксплуатации, МПа.

Переобозначим напряжения в левой части критерия (7) на максимальные напряжения  $(\sigma_{\max})$  в локальных зонах утонения ЭКИ. Максимальные напряжения определяем из уравнения (1), следовательно, критерий (8) примет вид

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ном}} \alpha_\sigma \leq 2R_{p0,2}^T, \quad (9)$$

$$\alpha_\sigma \leq \frac{2R_{p0,2}^T}{\sigma_{\text{ном}}}. \quad (10)$$

Введем понятие критического коэффициента концентрации напряжений в локальной зоне  $\alpha_\sigma^{\text{кр}}$  при использовании вместо номинальных напряжений максимально допустимых напряжений в аварийном режиме с учетом внутреннего давления и изгибающих моментов [19]. Номинальные напряжения ограничены критерием  $1.8[\sigma]$ , а допускаемый коэффициент концентрации напряжений примет вид

$$\left[ \begin{array}{l} \alpha_\sigma^{\text{кр}} \leq \frac{2R_{p0,2}^T}{1.8[\sigma]} = 1.66; \\ \alpha_\sigma^{\text{кр}} \leq \frac{2R_{p0,2}^T}{1.8[\sigma]} = 2.88 \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T}, \end{array} \right. \quad (11)$$

где  $R_m^T$  – минимально гарантированное значение временного сопротивления при температуре эксплуатации;  $R_{p0,2}^T$  – минимально гарантированное значение предела текучести при температуре эксплуатации;  $[\sigma]$  – допускаемые напряжения.

Используя формулу (6) и критерий (11) определим критическое утонение толщины стенки при аварийном режиме  $0,27s$ .

Концентратор деформаций ( $\alpha_\varepsilon^*$ ) в упругопластической области, согласно И.А. Биргеру [17], определяется из следующего соотношения:

$$\alpha_\sigma^* \cdot \alpha_\varepsilon^* = (0,8 \div 0,9)\alpha_\sigma^2, \quad (12)$$

где  $\alpha_\sigma^*$  и  $\alpha_\varepsilon^*$  – концентраторы напряжений и деформаций в упругопластической области.

Множитель  $(0,8 \div 0,9)$  зависит от степени упрочнения материала. Концентратор напряжений в упругопластической области ограничен пределом текучести и может быть определен уравнением

$$\alpha_\sigma^* = \frac{R_{p0,2}^T}{\sigma_{ном}}. \quad (13)$$

Действующие напряжения в зоне утонения могут превышать предел текучести в аварийных режимах, поэтому определим критический коэффициент концентрации деформаций. Используя соотношение (12), определим допускаемый коэффициент концентрации деформаций в упругопластической зоне:

$$\alpha_\varepsilon^{*кр} = 0,8 \frac{(\alpha_\sigma^{кр})^2}{\alpha_\sigma^*}. \quad (14)$$

Для аварийной ситуации критический коэффициент концентрации деформаций

$$\left[ \begin{array}{l} \alpha_\varepsilon^{*кр} \leq 2,64; \\ \alpha_\varepsilon^{*кр} \leq 4,59 \frac{R_{p0,2}^T}{R_m}. \end{array} \right. \quad (15)$$

Используя формулы (6), (12), (13) и критерий (15) определим критическое утонение толщины стенки при аварийном режиме через коэффициент концентрации деформаций –  $0,37s$  (для расчетов принято: внутреннее давление –  $11,7$  МПа; предел текучести –  $196$  МПа; температура среды –  $170$  °С).

Исходя из полученных результатов по критериям (11) и (15), консервативно использовать критерий концентрации напряжений (15).

Таблица

Значения максимально возможных утонений  
[Table. The maximum possible value of thickness]

Вид дефекта [The type of defect]	Локальное утонение [Local thickness]		Трещина [The crack]
Критерий [Criteria]	При $\alpha_\sigma^{кр}$ [ $\alpha_\sigma^{cr}$ ]	При $\alpha_\varepsilon^{*кр}$ [ $\alpha_\varepsilon^{*cr}$ ]	Метод НПШ [The method LPC]
Критическая толщина [Critical crack]	$0,27s$	$0,37s$	$0,18s$

В таблице приведены значения максимально возможных утонений, полученных из результатов по критериям (11) и (15) и методом нагрузки пластического шарнира (НПШ) [20] с осевой и кольцевой трещинами в аварийном режиме.

## Заключение

Рассмотрены различные формы локальных утонений, которые типичны для трубопроводов, подверженных механизму деградации эрозионно-коррозионного износа: сферическое, обширное и равномерное утонения. На основе полученных данных построена огибающая мастер-кривая (6) для коэффициента концентрации напряжений. Получена формула для оценки прочности с учетом различных форм утонений (7).

Получены критерии критических значений коэффициентов концентрации напряжений (11) и деформаций (15), которые позволяют определять критические значения утонений в аварийном режиме эксплуатации.

Критерии допускаемых значений коэффициентов концентрации напряжений справедливо использовать только в тех случаях, когда значения напряжений в зоне утонения не превышают значений предела текучести, в противном случае необходимо использовать критерии коэффициента концентрации деформаций.

## Список литературы

1. Поваров О.А., Томаров Г.В., Жаров В.Н. Эрозия-коррозия элементов турбинных установок насыщенного пара // Теплоэнергетика. 1990. № 12. С. 21–32.
2. Степанов И.А. Мониторинг остаточного ресурса оборудования АЭС по показателям коррозионно-механического износа конструкционных материалов // Теплоэнергетика. 1994. № 5. С. 36–39.
3. Филлипс М. Влияние химической обработки воды и особенностей конструкции на коррозию трубчатых подогревателей питательной воды из углеродистой стали // Энергетические машины и установки. 1969. № 2. С. 42–50.
4. Токохаш С., Хоринутти Т. Гидродинамические силы, вызывающие ударную коррозию входных концов трубок из углеродистой стали в подогревателях высокого давления // Новости зарубежной техники. Вып. 95. Л., 1974. С. 5–25.
5. Wu P.C.S. Pipe wall thinning in US light water reactors // IAEA Vienna: Proceedings of Specialists Meeting Organized by the Inter. Atom. Energy Agency (Vienna, 12–14 September, 1988). 1990. Pp. 41–42.
6. Vivekanand Kain. Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies // Procedia Engineer-

ing. 2014. No. 86. Pp. 576–588. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.083

7. Кузьмин Д.А. Исследование условий обеспечения безопасности главного циркуляционного трубопровода на основе концепции ТПР // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 5. С. 16–23.

8. Xiaohui Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen. Stress concentration factor and fatigue analysis of a lateral nozzle with local wall thinning // Engineering Failure Analysis. July 2019. Vol. 105. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.004

9. Fratila Marcu. Considerations on the stresses concentration factor // Journal of Engineering Studies and Research. 2012. Vol. 18. No. 4. DOI: 10.29081/jesr.v18i4.148

10. Shim D.J., Choi J.B., Kim Y.J., Kim J.W., Park C.Y. Assessment of Local Wall Thinned Pipeline Under Combined Bending and Pressure // International Journal of Modern Physics B. January 2012. Vol. 17. No. 8–9. Pp. 1870–1876. DOI: 10.1142/S0217979203019800

11. Pástor M., Frankovský P., Hagara M., Lengvarský P. The use of optical methods in the analysis of the areas with stress concentration // Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 68. No 2. Pp. 61–76.

12. Великоуваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Миленин А.С., Пивторак Н.И. Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой // Автоматическая сварка. 2015. № 1. С. 22–27.

13. Юрманов Е.В., Юрманов В.А., Гуцин В.Н., Архипов О.П., Шутько К.И., Алешин А.В. Оценка кор-

розионного утонения оборудования и трубопроводов СВБ энергоблока № 3 Смоленской АЭС в условиях эксплуатации до 45 лет // Годовой отчет НИКИЭТ-2018. 2018.

14. Томаров Г.В., Шипков А.А., Комиссарова Т.Н. Локальная эрозия-коррозия сварных соединений трубопроводов энергоблоков АЭС: особенности механизма и предупреждение повреждений // Теплоэнергетика. 2019. № 2. С. 76–86.

15. Бышиева О.И., Фасхутдинов А.А., Хазиахметов М.Ф., Юнусова Ф.Т. Способы оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. № 5. С. 137–139.

16. Никулина М.М., Абакаров А.М. Влияние коррозии на напряженное состояние изогнутой трубы // Процессы управления и устойчивость. 2019. № 1. С. 107–111.

17. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.

18. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 560 с.

19. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомнадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989. 524 с.

20. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). М.: Энергоиздат, 2010. 424 с.

RESEARCH PAPER

## The research of the stress-strain state with local thinning in pipelines and determination of allowable values of concentration stress and strain

Dmitry A. Kuzmin, Anastasia V. Andreenkova\*

All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, 25 Ferganskaya St., Moscow, 109507, Russian Federation

\*Andreenkova26@list.ru

### Article history:

Received: August 05, 2019

Revised: October 09, 2019

Accepted: October 13, 2019

### Abstract

**Relevance.** The nuclear power plant contains a large number of equipment and pipelines subject to flow acceleration corrosion. As a result of a combination of various parameters – sizes (diameters, wall thickness), operational parameters (internal pressure, temperature), steels and elements types – the number of design cases is tens of thousands, without counting the possible forms of thinning. The process of maintenance and repair at the stations are doing an assessment of the accordance of actual and allowable values of wall thicknesses. The ensuring safe operations of equipment and pipelines have been introduced correction functions for regulatory functions, taking into account the forms of thinning, to determine the permissible thinning. **The aim of the work.** The task is to determine the influence of the forms and types of thinning on the stress-strain state

Dmitry A. Kuzmin, PhD, head of NPP Reliability Division.

Anastasia V. Andreenkova, master's degree, engineer of I category.

and to determine the most critical thinning for straight sections of pipelines subject to flow acceleration corrosion taking into account emergency conditions. **Methods.** The allowable values of stress concentration factors (deformations) of pipelines subject without flow acceleration corrosion was determined taking into account allowable values, the requirements of the federal norms and rules for emergency operating conditions. For researches of the stress concentration coefficients were used the finite element method and analytical methods for various shapes, sizes and depths of thinning. **Results.** A method has been developed, that allows getting the maximum allowable values of stress concentration factors (deformations) for emergency operation, which afford to determine the maximum allowable depth of thinning in emergency conditions – an above criterion. The researches have been carried out definition of the stress concentration factors for local thinning with various types of these thinning. The functions of concentration coefficients depending on the geometric parameters of local thinning wall thickness were determined for a straight section of the pipeline. As a result of the research, the dependences of the sizes of thinning on the concentration coefficients for straight pipelines were created and a master-curve was obtained. The researches were carried out take into account the load from internal pressure and bending moment.

**Keywords:** pipelines; flow acceleration corrosion; volume thinning, stress concentration coefficient; strength

#### For citation

Kuzmin D.A., Andreenkova A.V. (2019). The research of the stress-strain state with local thinning in pipelines and determination of allowable values of concentration stress and strain. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 384–391. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-384-391>. (In Russ.)

#### References

1. Povarov O.A., Tomarov G.V., Zharov V.N. (1990). Eroziya-korroziya elementov turbinnih ustanovok nasyshchennogo para [Erosion-corrosion of elements of turbine units of saturated steam]. *Teploenergetika [Thermal Engineering]*, (12), 21–32. (In Russ.)
2. Stepanov I.A. (1994). Monitoring ostatochnogo resursa oborudovaniya AES po pokazatelyam korroziionno-mekhanicheskogo iznosa konstrukcionnyh materialov [Monitoring the residual life of NPP equipment by indicators of corrosion-mechanical wear of structural materials]. *Teploenergetika [Thermal Engineering]*, (5), 36–39. (In Russ.)
3. Fillips M. (1969). Vliyanie himicheskoy obrabotki vody i osobennostej konstrukcii na korroziyu trubchatyh podogrevatelej pitatel'noj vody iz uglerodistoj stali [The effect of chemical water treatment and structural features on the corrosion of tubular carbon steel feed water heaters]. *Energeticheskie mashiny i ustanovki [Power machines and installations]*, (2), 42–50. (In Russ.)
4. Tokohash S., Horinuti T. (1974). Gidrodinamicheskie sily, vyzvyvayushchie udarnuyu korroziyu vhodnyh koncov trubok iz uglerodistoj stali v podogrevatelyah vysokogo davleniya [Hydrodynamic forces causing shock corrosion of carbon steel inlet ends in high pressure heaters]. *Novosti zarubezhnoj tekhniki [News of foreign technology]*, (95), 5–25. (In Russ.)
5. Wu P.C.S. (1990). Pipe wall thinning in US light water reactors. *IAEA Vienna: Proceedings of Specialists Meeting Organized by the Inter. Atom. Energy Agency (Vienna, 12–14 September 1988)* (pp. 41–42).
6. Vivekanand Kain. (2014). Flow Accelerated Corrosion: Forms, Mechanisms and Case Studies. *Procedia Engineering*, (86), 576–588. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.083
7. Kuz'min D.A. (2016). Investigation of the conditions of safety ensure of the main circulating pipeline on the basis of the LBB concept. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (5), 16–23. (In Russ.)
8. Xiaohui Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen. (2019). Stress concentration factor and fatigue analysis of a lateral nozzle with local wall thinning. *Engineering Failure Analysis*, 105. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.004
9. Fratila Marcu. (2012). Considerations on the stresses concentration factor. *Journal of Engineering Studies and Research*, 18(4). DOI: 10.29081/jesr.v18i4.148
10. Shim D.J., Choi J.B., Kim Y.J., Kim J.W., Park C.Y. (2012). Assessment of Local Wall Thinned Pipeline Under Combined Bending and Pressure. *International Journal of Modern Physics B*, 17(8–9), 1870–1876. DOI: 10.1142/S0217979203019800
11. Pástor M., Frankovský P., Hagara M., Lengvarský P. (2018). The use of optical methods in the analysis of the areas with stress concentration. *Journal of Mechanical Engineering*, 68(2), 61–76.
12. Velikoivanenko E.A., Rozyinka G.F., Milenin A.S., Pivtorak N.I. (2015). Ocenka rabotosposobnosti magistral'nogo truboprovoda s lokal'nym utoneniem stenki pri remonte dugovoj naplavkoj [Performance assessment of the main pipeline with local thinning of the wall during repair by arc surfacing]. *Avtomaticheskaya svarka*, (1), 22–27. (In Russ.)
13. Yurmanov E.V., Yurmanov V.A., Gushchin V.N., Arhipov O.P., Shut'ko K.I., Aleshin A.V. (2018). Ocenka korroziionnogo utoneniya oborudovaniya i truboprovodov SVB energobloka No. 3 Smolenskoj AES v usloviyah ekspluatatsii do 45 let [Assessment of corrosion thinning of equipment and pipelines of important systems for the safe-

ty of Unit 3 of Smolensk NPP under operating conditions up to 45 years]. *Godovoj otchet NIKIET-2018*. (In Russ.)

14. Tomarov G.V., Spikov A.A., Komissarova T.N. (2019). Lokal'naya eroziya-korroziya svarnyh soedinenij truboprovodov energoblokov AES: osobennosti mekhanizma i preduprezhdenie povrezhdenij [Local erosion-corrosion of welded joints of pipelines of NPP power units: mechanism features and damage prevention]. *Teploenergetika*, (2), 76–86. (In Russ.)

15. Byvsheva O.I., Faskhutdinov A.A., Haziakhmetov M.F., Yunusova F.T. (2015). Sposoby ocenki ostatocznego resursa tekhnologicheskikh truboprovodov [Methods of estimation of residual resource of technological pipelines]. *Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti i diagnostika opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov* [Examination of industrial safety and diagnostics of hazardous production facilities], (5), 137–139. (In Russ.)

16. Nikulina M.M., Abakarov A.M. (2019). Vliyanie korrozii na napryazhennoe sostoyanie izognutoj trubyy [Influence of corrosion on the stress state of a bent pipe]. *Processy upravleniya i ustojchivost'*, (1), 107–111. (In Russ.)

17. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. (1979). *Raschet na prochnost' detalej mashin: spravochnik. 3-e izd., pererab. i dop.* [Calculation of the strength of machine parts: reference book. 3<sup>rd</sup> ed.]. Moscow, Mashinostroenie Publ. (In Russ.)

18. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. (1979). *Teoriya uprugosti. 2-e izd.* [Theory of elasticity. 2<sup>nd</sup> ed.]. Moscow, Nauka Publ. (In Russ.)

19. PNAE G-7-002-86. *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok* [Norms of calculation for strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. (1989). Gosatomnadzor SSSR. Moscow, Energoatomizdat Publ. (In Russ.)

20. Arkadov G.V., Getman A.F., Rodionov A.N. (2010). *Nadezhnost' oborudovaniya i truboprovodov AES i optimizatsiya ikh zhiznennogo tsikla (veroyatnostnye metody)* [The reliability of the equipment and pipelines of nuclear power plants and optimisation of their life cycle (probabilistic methods)]. Moscow: Energoizdat Publ. (In Russ.)

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-392-398  
УДК 8.614.66.092-97

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Расчет сейсмозащитных качеств демпфера и гасителя с возможностью их использования в летательных аппаратах

И.У. Маджидов<sup>1</sup>, М.Б. Арипходжаева<sup>2</sup>, Д.М. Рахматова<sup>2</sup>, А.А. Сулейманов<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан, Республика Узбекистан, 100100, Ташкент, ул. 2-я Чимбайская, 96<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, Республика Узбекистан, 100100, Ташкент, ул. Университетская, 2

\*ibragimov-dem@yandex.com

### История статьи:

Поступила в редакцию: 14 февраля 2019 г.

Доработана: 15 сентября 2019 г.

Принята к публикации: 07 октября 2019 г.

### Аннотация

**Целью** исследования является определение наиболее эффективных сейсмозащитных устройств, а также степени их надежности в различных условиях. Дана методика сравнительного расчета для определения качества сейсмозащитных устройств. Приведен пример расчета для демпфера и гасителя. Расчеты показывают, что использование сейсмозащитных устройств уменьшает коэффициент  $K_3$  более чем в два раза. Сейсмозащита является актуальной проблемой не только в строительстве, но и во всех отраслях техносферы. Рассматривается возможность использования сейсмозащитных устройств в летательных аппаратах. **Методы.** Проводится сравнительный расчет поведения гасителей и демпферов с учетом коэффициентов трения  $f_{тр}$ , суммы вертикальных нагрузок  $\sum Q_{кл}$ , суммарной перерезывающей сейсмической силы  $\sum S_{лк}$ . Представлены рисунки – схемы расположения сейсмозащитных устройств (демпфера и гасителя) под зданием, а также варианты их установки в летательных аппаратах. Сравнительные расчеты проводятся с наличием сейсмозащитных установок и без них. **Результаты.** По итогам исследования выявлено изменение величины горизонтальных сейсмических нагрузок  $S_{ж}$  в пределах 2,26–2,46 раза. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что предложенное демпферное устройство снижает сейсмическую нагрузку, приходящуюся на защищаемое сооружение, на 1–2 балла, то есть почти с такой же эффективностью, как гасители (отличие в 0,3 раза).

**Ключевые слова:** сейсмозащитные устройства; демпфер; сейсмогаситель; коэффициент диссипации; декремент колебания; сеймовоздействие; здания и сооружения; летательные аппараты; сейсмические нагрузки; горизонтальные и вертикальные нагрузки

### Для цитирования

Маджидов И.У., Арипходжаева М.Б., Рахматова Д.М., Сулейманов А.А. Расчет сейсмозащитных качеств демпфера и гасителя с возможностью их использования в летательных аппаратах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 392–398. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-392-398>

## Введение

В статье рассматривается сравнительный расчет гасителей и демпферов для применения в зда-

ниях и сооружениях, а также в летательных аппаратах. При сейсмической нагрузке происходит разрушение зданий и сооружений, а также отдельно стоящих (или находящихся в ангарах) летательных аппаратов. Ожидается, что возможно снижение сейсмической нагрузки при применении сейсмозащитных устройств.

Произведен расчет способности каждой из установок снизить вертикальные и горизонтальные нагрузки, приходящиеся на конструкции. На рис. 1 и 2 даны схемы установки демпферов и гасителей в зданиях. На рис. 3 – схема установки на летательные аппараты.

Шасси представляет собой демпферную стойку, к которой крепится колесная тележка (у гид-

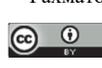
Маджидов Иномжон Урушевич, доктор технических наук, профессор. Арипходжаева Малика Бахтияровна, старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности.

Рахматова Дилноза Мухитдиновна, старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности.

Сулейманов Адылжан Арифджанович, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности. eLIBRARY SPIN-код: 2555-7348.

© Маджидов И.У., Арипходжаева М.Б.,

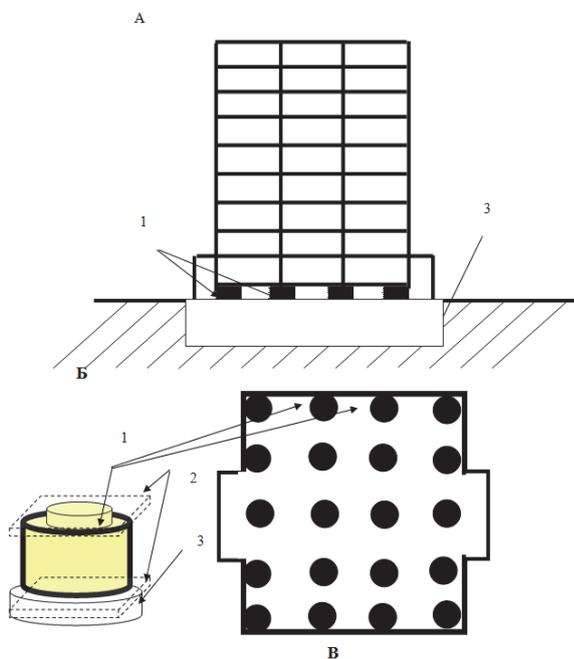
Рахматова Д.М., Сулейманов А.А., 2019

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ропланов – поплавков). В зависимости от массы самолета различаются конфигурации шасси. Наиболее часто встречающиеся: одна передняя стойка и две основных (Ту-154, А320), одна передняя и три основных (Ил-96), одна передняя и четыре основных (Боинг 747), две передних и две основных (В-52). На рис. 4 даны формы и свободные колебания зданий и сооружений при использовании активных сейсмозащитных систем [1–3].

### Исходные расчетные данные, формулы и схемы

При расчете степени влияния сейсмических воздействий с учетом активной сейсмозащиты на объект исследования придерживаются нормативных данных, заложенных в КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах» (Курилиш мейор койдалари – Строительные нормы и правила).



**Рис. 1.** Схема расположения демпферных устройств под зданием: *A* – вид фасада здания; *B* – аксонометрия демпферного устройства; *B* – расположение 23 демпферных устройств под зданием; *1* – паронитовое демпферное устройство; *2* – металлические пластины крепления; *3* – железобетонная подушка (полуподвальный производственный отсек)

[Figure 1. The scheme of an arrangement of damping devices under the building:

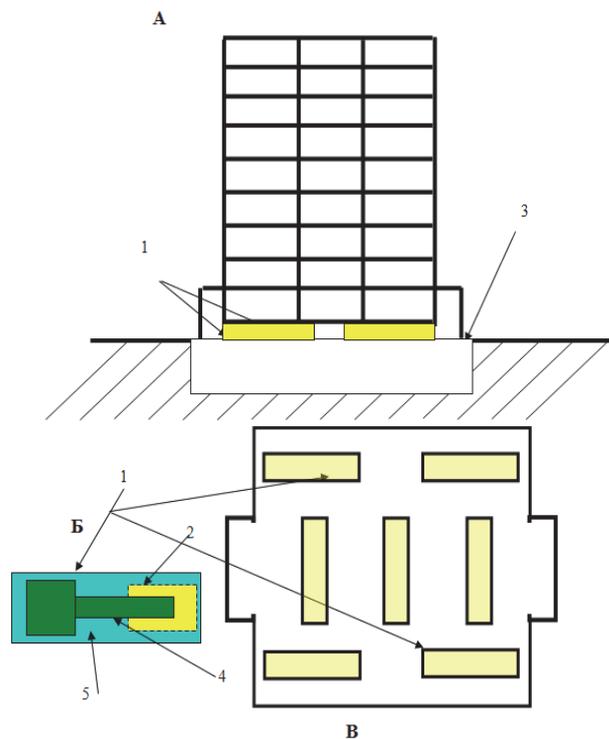
*A* – view of the facade of the building; *B* – axonometry of the damper device; *B* – location of 23 damper devices under the building; *1* – paronite damping device; *2* – metal mounting plates; *3* – reinforced concrete cushion (basement production compartment)]

Вводится коэффициент снижения амплитуд ускорений  $K_3$  ( $K_3$  – коэффициент снижения амплитуд горизонтальных ускорений), который необходим для учета совокупного воздействия устройств активной сейсмозащиты на защищаемое сооруже-

ние (табл. 2.7 п. 2.13 КМК нормирует коэффициент  $\alpha$  в зависимости от сейсмичности площадки строительства (в баллах)) [4]. Расчетное значение  $K_3$ , как показано в работе Л.Л. Солдатовой [5–6], определяется из условия не превышения суммарной перерезывающей силы уровня скользящего пояса по формуле

$$K_3 = f_{тр} \sum_{k=1}^n Q_k / \sum_{k=1}^n S_{ik}, \quad (1)$$

где  $f_{тр}$  – коэффициент трения скольжения в опорах при использовании сейсмозащитных устройств.



**Рис. 2.** Схема расположения гасителей под зданием:

*A* – вид фасада здания; *B* – схема гасителя; *B* – расположение 7 гасителей под зданием; *1* – гаситель; *2* – пневмонагнетатель; *3* – железобетонная подушка (полуподвальный производственный отсек); *4* – стержень с поршнем; *5* – жидкость для гашения колебаний  
[Figure 2. Layout of vibration transducers under the building: *A* – view of the facade of the building; *B* – vibration transducer scheme; *B* – the location of 7 vibration transducers under the building; *1* – vibration transducer; *2* – air blower; *3* – reinforced concrete cushion (basement production compartment); *4* – rod with piston; *5* – liquid for vibration damping]

$f_{тр}$  допускается уточнять на основе модельных или натуральных испытаний.

Для случая расчета без сейсмозащитного устройства для бетона  $f_{тр} = 0,445$ .

Для демпферного устройства  $f_{тр} = 0,2775$ .

Для гасителей  $f_{тр} = 0,1304$ .

$\sum Q_{кл}$  – сумма вертикальных нагрузок при использовании демпфера.

$\sum S_{dk}$  – суммарная перерезывающая сейсмическая сила при использовании демпфера.

$\sum Q_{kr}$  – сумма вертикальных нагрузок при использовании гасителя.

$\sum S_{rk}$  – суммарная перерезывающая сейсмическая сила при использовании гасителя.

Ряд уточнений взят также из КМК (коэффициент  $\alpha$  определялся по табл. 2.7 в зависимости от сейсмичности площадки строительства) для определения  $S_{ik}$ .

$$S_{ik} = K_0 K_{II} K_{ЭТ} K_p S_{oik}, \quad (2)$$

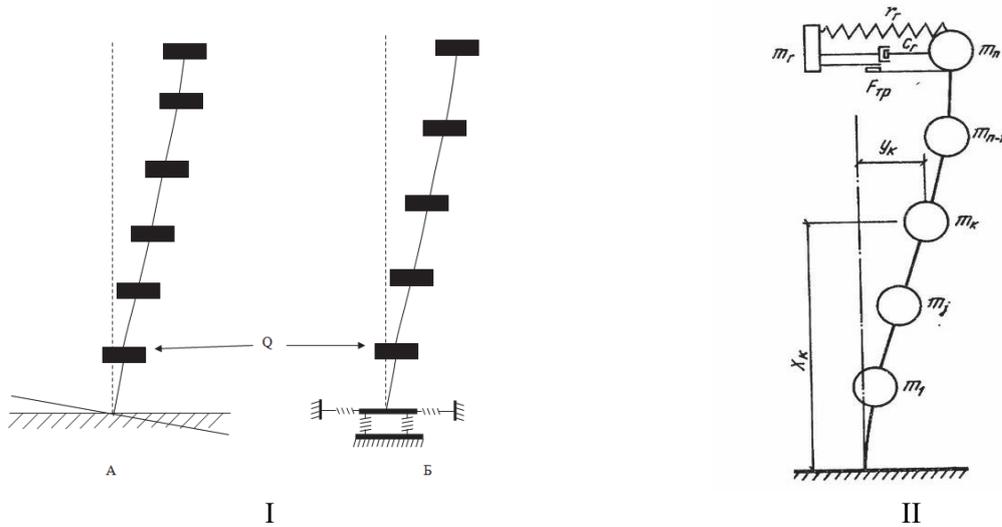
где  $K_0$  – коэффициент ответственности, принимаемый по табл. 2.3, зависящий от принятого для здания предельного состояния, для сооружений по степени важности подобным электростанции принимается равным 1,5 [4];  $K_{II}$  – коэффициент учета повторяемости землетрясений, по табл. 2.4 принимается равным 1,2;  $K_{ЭТ}$  – коэффициент, зависящий от этажности здания, по п. 2.17 принимается равным 1;  $K_p$  – коэффициент регулярности, определяемый по п. 2.25, принимается равным 1;  $S_{oik}$  – среднее значение сейсмической нагрузки, соответствующее  $i$ -му тону собственных колебаний, определяемое в предположении упругого деформирования конструкции по формуле

$$S_{oik} = \alpha Q_k W_i K_{\delta} \eta_{jk}, \quad (3)$$

где  $Q_k$  – нагрузки (постоянные и временные), вызывающие инерционную силу в точке  $k$ , определяющиеся по п. 1.3 КМК;  $\eta_{jk}$  – коэффициент, зависящий от формы деформации здания при его свободных колебаниях, принимается пп. 2.18 и 2.19 КМК.

Необходимо учитывать, что в технологии посадки летательных аппаратов сейчас активно используются амортизатор – устройство для гашения колебаний (демпфирования) и поглощения толчков и ударов подвижных элементов (подвески, колес), а также корпуса самого транспортного средства посредством превращения механической энергии движения (колебаний) в тепловую [7–9; 11–14]. Сейсмозащиту летательных аппаратов можно усиливать дополнительным встраиванием внутри летательного аппарата гасителей (рис 3.), позволяющих кинетическую энергию, приносимую сейсмонагрузкой, превращать в потенциальную.

$$\eta_{ik} = X_k \sum_{j=1}^n Q_j X_j / \sum_{j=1}^n Q_j X_j^2 \quad (4)$$



**Рис. 3.** Расчетные схемы для демпфера и гасителя с возможностью для устанавливания в летательных аппаратах:

*I* – сравнительные схемы устойчивости летательного аппарата: без демпферного устройства (*A*) и с демпферным устройством (*B*) [15–16];

$Q$  – нагрузка, приходящаяся на сооружение; *II* – расчетная схема с динамическим гасителем колебаний для летательных аппаратов:

$m(x)$  – погонная масса конструкций;  $X(x)$  – ордината нормированной формы собственных колебаний по основному тону (ордината в точке подвеса гасителя принимается равной единице);  $m_k$  – масса конструкций к нагрузке, сосредоточенная в точке с координатой  $x_k$ ;

$h$  – общая высота;  $n$  – общее число сосредоточенных масс  $F_{rp}$  – сила сухого трения в гасителе;  $C_r$  – коэффициент вязкого трения в гасителе;

$V_k$  – ускорение основания при землетрясении [17–18]

**[Figure 3.** Design schemes for the damper and vibration transducer when installed in aircraft:

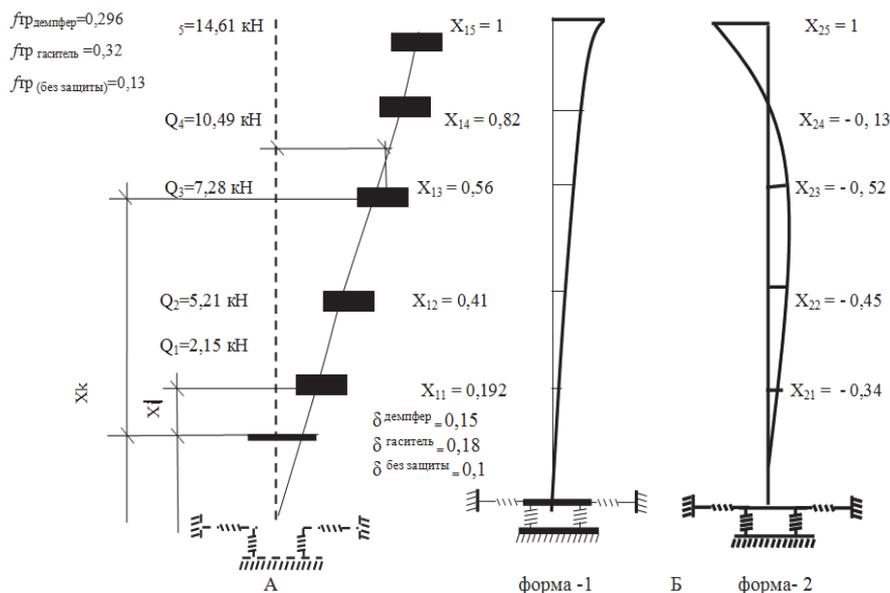
*I* – comparative stability schemes of the aircraft: without damper device (*A*) and with damper device (*B*) [15–16];  $Q$  – the load attributable to the structure;

*II* – the design scheme with a dynamic vibration transducer for aircraft:  $m(x)$  – the linear mass of structures;  $X(x)$  – the ordinate of the normalized form of natural oscillations in the basic tone (the ordinate at the point suspension of the vibration transducer is assumed to be equal to one);

$m_k$  – the mass of the structures to the load, concentrated at the point with the coordinate  $x_k$ ;  $h$  – is the total height;

$n$  – is the total number of concentrated masses;  $F_{rp}$  – is the dry friction force in the vibration transducer;

$C_r$  – is the coefficient of viscous friction in the vibration transducer;  $V_k$  – acceleration of the base in an earthquake [17–18]



**Рис. 4.** Расчетная схема: *A* – свободные колебания (с демпфером, гасителем и без защиты);  
*B* – 1 и 2 формы свободных колебаний здания при использовании активных систем сейсмозащиты;  
 $\delta$  – ослабление колебаний активной сейсмической защиты;  $f_{тр}$  – коэффициент трения скольжения при использовании активной сейсмозащиты [14; 17]  
**[Figure 4.** The design scheme: *A* – free oscillations (with damper, vibration transducer and without protection);  
*B* – 1 and 2 forms of free oscillations of the building when using active seismic protection systems:  
 $\delta$  – attenuation of oscillations of active seismic protection;  $f_{тр}$  – coefficient of sliding friction when using active seismic protection [14; 17]

**Практический расчет.** Для параметров здания, приведенного на рис 1, *A*, расчетное значение  $\eta_{jk}$  без сейсмозащиты – 1,049, для случая использования демпферного устройства  $\eta_{jkd}$  – 1,213, для случая использования гасителя  $\eta_{jkt}$  – 1,104.  $K_\delta$  – коэффициент, учитывающий диссипативные свойства конструкции, принимается согласно п. 2.16 КМК по формуле:  $\alpha$  – коэффициент, определяемый по табл. 2.7 в зависимости от сейсмичности площадки строительства;  $W_i$  – спектральный коэффициент, определяемый по п. 2.14 в зависимости от периода собственных колебаний здания, в нашем случае принят равным 0,83 [10]. При этом в качестве периода использован период свободных колебаний, найденный экспериментальным путем, то есть  $T = 0,5$  сек.

**Расчетное значение:**

$$k = 13,59 \text{ кПа}; (0,548 - \sqrt{\delta})(0,1 + 0,7/\sqrt{T_1}); K_\delta = e, \quad (5)$$

где  $\delta$  – декремент колебания, принимаемый по результатам натурных испытаний в упругой стадии зданий (сооружений), аналогичных проектируемому.

Согласно результатам экспериментальных данных, для здания без демпфера  $\delta = 0,10$ . Для случая применения демпферного устройства  $\delta = 0,15$ . Для случая применения гасителя  $\delta = 0,18$ .  $T_1$  – период собственных колебаний здания с учетом использования активных сейсмозащитных систем, при-

нимается равным 0,5 сек., для здания без демпферных систем – 0,3 сек. Следовательно:

$$(0,548 - \sqrt{0,18})(0,1 + 0,7/\sqrt{0,5});$$

$$K_\delta (\text{гаситель}) = e = 1,23;$$

$$(0,548 - \sqrt{0,15})(0,1 + 0,7/\sqrt{0,5});$$

$$K_\delta (\text{демпфер}) = e = 1,28;$$

$$(0,548 - \sqrt{0,10})(0,1 + 0,7/\sqrt{0,3});$$

$$K_\delta (\text{без демпфера}) = e = 1,73.$$

Подставив полученные значения в (3), определим, что  $S_{oik}$  при 8 баллах без демпферного устройства равно 5,68 кН, при использовании демпферного устройства – 6,01 кН, на основе гасителя – 6,2 кН.

Вычисление  $S_{ik}$ :

$$S_{ik} (\text{гаситель}) = 1 \times 0,9 \times 1,23 = 1,107 \text{ кН};$$

$$S_{ik} (\text{демпфер}) = 1 \times 0,9 \times 1,28 = 1,15 \text{ кН};$$

$$S_{ik} (\text{без защиты}) = 1 \times 0,9 \times 1,73 = 1,557 \text{ кН}.$$

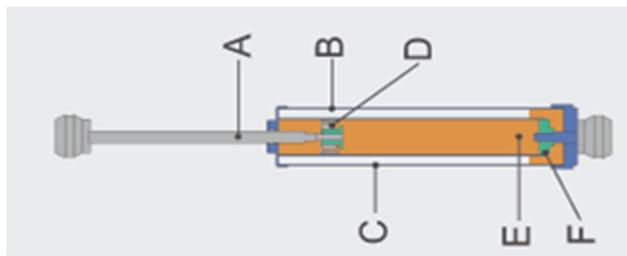
Полученные данные дают возможность вычислить коэффициент  $K_3$ :

$$K_3 (\text{гаситель}) = 0,296 \times 14,61 / 1,107 = 3,906;$$

$$K_3 (\text{демпфер}) = 0,32 \times 14,61 / 1,15 = 4,065;$$

$$K_3 (\text{без защиты}) = 0,13 \times 14,61 / 1,557 = 1,219.$$

Схема действия гидравлического двухтрубного сейсмоамортизатора, устанавливаемого в летательные аппараты, представлена на рис. 5 [13; 18].



**Рис. 5.** Двухтрубный гидравлический амортизатор:

*A* – нагнетающий стержень; *B* – внешняя труба;  
*C* – внутренняя труба; *D* – уплотняющий поршень;  
*E* – демпфирующая жидкость; *F* – обратный клапан  
**[Figure 5.** Double tube hydraulic shock absorber:  
*A* – discharge rod; *B* – external pipe; *C* – internal pipe;  
*D* – sealing piston; *E* – damping fluid; *F* – check valve]

После определения  $K_3$  пониженные за счет применения демпферной системы величины горизонтальных сейсмических нагрузок  $S_{ik}$ , с учетом которых необходимо рассчитывать надземные конструкции здания, находятся при помощи формул (1) и (3) с заменой значений  $\alpha$  на значение  $\alpha K_3$  [19].

$$S_{ik(\text{гаситель})}^* = S_{ik(\text{гаситель})} \times K_3(\text{гаситель}) = 1,107 \times 3,906 = 4,32;$$

$$S_{ik(\text{демпер})}^* = S_{ik(\text{демпер})} \times K_3(\text{демпер}) = 1,15 \times 4,065 = 4,67;$$

$$S_{ik(\text{без защиты})}^* = S_{ik(\text{без защиты})} \times K_3(\text{без защиты}) = \\ = 1,557 \times 1,219 = 1,899.$$

### Заключение

Уменьшение  $S_{ik}$  для случая использования демпферного устройства по сравнению с вариантом без использования сейсмозащитного устройства –  $4,67 / 1,899 = 2,46$  раза. По сравнению с вариантом с гасителем –  $4,32 / 1,899 = 2,276$  раза. Таким образом, расчеты показывают, что использование сейсмозащитных устройств уменьшает коэффициент  $K_3$  более чем в два раза. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что предложенное демпферное устройство снижает сейсмическую нагрузку, приходящуюся на защищаемое сооружение на 1–2 балла, то есть почти с такой же эффективностью, как гасители (отличие на 8 %). Однако необходимо учитывать, что себестоимость демпферных устройств гораздо ниже по сравнению с гасителями. Кроме этого, демпферные устройства имеют высокую степень взаимозаменяемости. Для условий же летательных аппаратов наиболее эффективно устанавливать уже внутри не демпферы, а именно гасители сеймонагрузки (рис. 5), так как в шасси технически предусмотрено демпфирование за счет амортизаторов.

### Список литературы

1. Сулейманов А.А., Ибрагимов Б.Т. Оценка фактора пожара при землетрясениях // Современное состояние и перспективы развития механики на основе компьютерных технологий СамГАСИ. Самарканд, 2017. С. 34–36.
2. Маджидов И.У., Ибрагимов Б.Т., Сулейманов А.А. Анализ пожарной опасности сейсмозащитных деформационных швов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 75–80.
3. Мустакимов В.Р. Проектирование сейсмостойких зданий: учебное пособие. Казань, 2016. С. 22–78.
4. КМК 2.01.03-96. Строительство в сейсмических районах. Ташкент: Госкомархитектстрой, 1997. 127 с.
5. Баласанян С.Ю., Назарян С.Н. Сейсмическая защита и ее организация. Гюмри: Эльдорадо, 2004. 436 с.
6. Поляков С.В., Килимник Л.Ш., Солдатова Л.Л. Опыт возведения зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом в фундаменте. М.: Стройиздат, 1984. 32 с.
7. Ахмедов М.А. Оценка повреждаемости наиболее распространенных типов конструкции жилых зданий при сильных землетрясениях в республике // Оценка сейсмической опасности и сейсмической риска: материалы Международной конференции. Ташкент, 2004. С. 20–33.
8. Айзенберг Я.М. Совершенствование антисейсмического проектирования и строительства: обзорно-аналитический доклад / ВНИИСТПИ. М., 2006. 111 с. (Строительство и архитектура).
9. Сулейманов А.А., Яскевич М.В., Таманова В.В. Универсальный временной вектор при спасении пострадавших в результате сонаправленного воздействия сейсмопожароопасного фактора // Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты: сборник статей студентов, магистров, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Вып. 26. Пермь, 2018. С. 58–59.
10. Suleimanov A.A., Ibragimov B.T. Research of Thermal and Mechanical Influence on Ferro-Concrete Designs with Damping Inserts // International Journal of Advanced Research in Science Engineering and Technology (IJARSET). 2017. Vol. 4. No. 9. Pp. 4595–4598.
11. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Стержневые системы в форме однополостного гиперboloида вращения // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2011. № 11. С. 19–23.
12. Bramski C. Obrotomo-symetryczne zbiorniki kroplokstaltne. Analiza pracy powloki // Zesz. nauk. Bialostock. Nauki techn. 1981. No. 35. 50 p.
13. Yuguo Wu, Yake Jiang, Bo Gao, Zhigang Liu, Jing Liu. Thermodynamic analysis on an instantaneous water heating system of shower wastewater source heat pump // Journal of Water Reuse and Desalination. 2018. No. 8 (3). Pp. 404–411.
14. Kurtz-Orecka K., Tuchowski W. Combined heat pumpdistrict heating network energy source. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 49. 00063. DOI: 10.1051/e3sconf/20184900063
15. Hatem M. El Ssayd, Hussam E. Zaineh, Draji Dojcinovski, Vladimir Mihailov. Re-Evaluations of Seismic Hazard of Syria // International Journal of Geosciences. 2012. No. 3. Pp. 847–855.

16. Sadooni F.N., Alsharhan A.S. Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the Nauddud Formation (Albian – Cenomanian) in the Arabian Jult basin // AAPG Bull. 2003. Vol. 87. No. 10. Pp. 1653–1680.

17. Mohamad Khir Abdul-Wahed, Ibrahim Al-Tahham. Preliminary outline of the seismologically active zones in Syria // Annals of geophysics. 2010. Vol. 53. No. 4. doi: 10.4401/ag-4683

18. Rawaa Dakkak, Maen Mreish, Mohamad Daoud, George Hade. The Syrian National Seismological Network (SNSN): monitoring a major continental transform fault // Seismological Research Letters. 2005. Vol. 76. No. 4. Pp. 437–445.

19. Woloszyn J., Golaś A. Coefficient of Performance Stabilisation in Ground Source Heat Pump Systems // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2017. No. 5 (4). Pp. 645–656.

RESEARCH PAPER

## Calculation of seismic qualities of the damper and vibration transducer with the possibility of their use in aircraft

Inomzhon U. Madzhidov<sup>1</sup>, Malika B. Aripkhodzhaeva<sup>2</sup>, Dilnoza M. Rakhmatova<sup>2</sup>, Adiljan A. Suleymanov<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ministry of Higher and Secondary Special Education of Uzbekistan, 96 2-ya Chimbaiskaya St., Tashkent, 100100, Republic of Uzbekistan

<sup>2</sup>Tashkent State Technical University, 2 Universitetskaya St., Tashkent, 100100, Republic of Uzbekistan

\*ibragimov-dem@yandex.com

### Article history:

Received: February 14, 2019

Revised: September 15, 2019

Accepted: October 07, 2019

### Abstract

**The aim of the work.** The article aims to determine the most effective seismic protection devices, as well as their degree of reliability in different conditions. The method of comparative calculation for determining the quality of seismic protection devices is given. An example of calculation for the damper and vibration transducer is carried out. Calculations show that the use of seismic protection devices reduces the coefficient of  $K_3$  more than twice. Seismic protection is an urgent problem not only in construction, but also in all branches of the technosphere. The option of using seismic protection devices in aircraft is also considered. **Methods.** A comparative calculation of the behavior of dampers and vibration transducer taking into account the friction coefficients  $f_{ir}$ , the sum of vertical loads  $\sum Q_{kd}$ , the total shear seismic force  $\sum S_{dc}$  is considered. The diagram of the location of seismic protection devices (damper and vibration transducer) under the building is presented, as well as the options for installation in aircraft are given. Comparative calculations are carried out with the presence of seismic protection installations and without them. **Results.** The total result is given taking into account the change in the value of horizontal seismic loads  $S_{ik}$ , which has changed in the range of 2.26–2.46 times. This circumstance allows to conclude that the proposed damping device reduces the seismic load, which falls on the protected structure, by 1–2 points, with almost the same efficiency as the vibration transducers (difference of 0.3 times).

**Keywords:** seismic protection devices; damper; seismic damper; dissipation factor; vibration decrement; seismic activity; buildings and structures; aircraft; seismic loads; horizontal and vertical loads

### For citation

Madzhidov I.U., Aripkhodzhaeva M.B., Rakhmatova D.M., Suleymanov A.A. (2019). Calculation of seismic qualities of the damper and vibration transducer with the possibility of their use in aircraft. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 392–398. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-392-398>. (In Russ.)

### References

1. Suleymanov A.A., Ibragimov B.T. (2017). Ocenka faktora pozhara pri zemletryaseniyaх [Assessment of the fire factor in earthquakes]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya mekhaniki na osnove komp'yuternykh tekhnologij SamGASI* [Current state and prospects of develop-

ment of mechanics on the basis of computer technologies of SamGASI] (pp. 34–36). Samarkand. (In Russ.)

2. Majidov I.U., Ibragimov B.T., Suleymanov A.A. (2019). Fire danger analysis of seismic expansion joints. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(1), 75–80. (In Russ.)

3. Mustakimov V.R. (2016). Proektirovanie sejsmostojkikh zdaniy: uchebnoe posobie [Design of earthquake-resistant buildings: textbook] (pp. 22–78). Kazan. (In Russ.)

4. KMK2.01.03-96. (1997). Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah [Construction in seismic areas]. Tashkent, Goskomarkhitektstroy Publ. (In Russ.)

**Inomjon U. Madzhidov**, Doctor of Technical Sciences, Professor.

**Malika B. Aripkhodzhaeva**, senior lecturer, Department of Safety of Life.

**Dilnoza M. Rakhmatova**, senior lecturer, Department of Safety of Life.

**Adylzhan A. Suleymanov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Safety of Life. eLIBRARY SPIN-code: 2555-7348.

5. Balasanyan S.Yu., Nazaretyan S.N. (2004). Seismicheskaya zashchita i ee organizatsiya [*Seismic protection of and its organization*]. Gyumri: El Dorado. (In Russ.)
6. Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Soldatova L.L. (1984). Opyt vozvedeniya zdaniy s seismoizoliruyushchim skol'zyashchim poyasom v fundamente [Experience of erection of buildings with a seismic-insulating sliding belt in the foundation]. Moscow, Stroizdat Publ. (In Russ.)
7. Akhmedov M.A. (2004). Ocenka povrezhdaemosti naibolee rasprostranennykh tipov konstruktsii zhilykh zdaniy pri sil'nykh zemletryaseniyah v respublike [Damage assessment of the most common types of construction of residential buildings during strong earthquakes in the republic]. *Ocenka seismicheskoy opasnosti i seismicheskoy riska: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii [Assessment of seismic hazard and seismic risk: Proceedings of the International Conference]* (pp. 20–33). Tashkent. (In Russ.)
8. Eisenberg J.M. (2006). Sovershenstvovanie anti-seismicheskogo proektirovaniya i stroitel'stva: obzorno-analiticheskij doklad [*Improving seismic design and construction. Review and analytical report*]. Moscow, VNIINTPI Publ. (In Russ.)
9. Suleymanov A.A., Yaskevich M.V., Tamanova V.V. (2018). Universal'nyy vremennoy vektor pri spasenii postradavshih v rezul'tate sonapravlennoy vozdeystviya seismopozharopasnogo faktora [Universal time vector in the rescue of victims as a result of the co-directional impact of seismic fire hazard factor]. *Razvitie sovremennoy nauki: teoreticheskie i prikladnye aspekty: sbornik statej studentov, magistrrov, aspirantov, molodyh uchenykh i prepodavatelej [Development of modern science: theoretical and applied aspects: collection of articles of students, masters, postgraduates, young scientists and teachers]* (issue 26, pp. 58–59). Perm. (In Russ.)
10. Suleimanov A.A., Ibragimov B.T. (2017). Research of Thermal and Mechanical Influence on Ferro-Concrete Designs with Damping Inserts. *International Journal of Advanced Research in Science Engineering and Technology (IJARSET)*, 4(9), 4595–4598.
11. Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. (2011). Sterzhnevye sistemy v forme odnopolostnogo giperboloida vrashcheniya [Rod systems in the form of a single-cavity hyperboloid of rotation]. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve [Assembly and special works in construction]*, (11), 19–23. (In Russ.)
12. Bramski C. (1981). Obrotomo-symetryczne zbiorniki kroplokstaltne. Analiza pracy powloki. *Zesz. nauk. Bialostock. Nauki techn.*, (35). (In Polish.)
13. Yuguo Wu, Yake Jiang, Bo Gao, Zhigang Liu, Jing Liu. (2018). Thermodynamic analysis on an instantaneous water heating system of shower wastewater source heat pump. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(3), 404–411.
14. Kurtz-Orecka K., Tuchowski W. (2018). Combined heat pumpdistrict heating network energy source. *E3S Web of Conferences*, 49, 00063.
15. Hatem M. El Ssayd, Hussam E. Zaineh, Draji Dojcinovski, Vladimir Mihailov. (2012). Re-Evaluations of Seismic Hazard of Syria. *International Journal of Geosciences*, (3), 847–855.
16. Sadooni F.N., Alsharhan A.S. (2003). Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the Nauddud Formation (Albian – Cenomanian) in the Arabian Jult basin. *AAPG Bull.*, 87(10), 1653–1680.
17. Mohamad Khir Abdul-Wahed, Ibrahim Al-Tahham. (2010). Preliminary outline of the seismologically active zones in Syria. *Annals of geophysics*, 53(4). doi: 10.4401/ag-4683
18. Rawaa Dakkak, Maen Mreish, Mohamad Daoud, George Hade. (2005). The Syrian National Seismological Network (SNSN): Monitoring A Major Continental Transform Fault. *Seismological Research Letters*, 76(4), 437–445. doi:10.1785/gssrl.76.4.437
19. Wołoszyn J., Gołaś A. (2017). Coefficient of Performance Stabilisation in Ground Source Heat Pump Systems. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 5(4), 645–656.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
EXPERIMENTAL RESEARCHESDOI 10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404  
УДК 624.04:004

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Использование точек покоя при экспериментальном изучении  
внутреннего трения в материале

В.Б. Зылев, П.О. Платнов\*

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9  
\*manuntdfan@mail.ru

## История статьи:

Поступила в редакцию: 11 мая 2019 г.  
Доработана: 04 октября 2019 г.  
Принята к публикации: 10 октября 2019 г.

## Аннотация

**Цели.** Работа посвящена экспериментальному определению параметров внутреннего трения в материале. **Методы.** Внутреннее трение изучается путем рассмотрения затухающих колебаний экспериментальной установки, которая состоит из весьма жестких дисков и стального образца, испытывающего напряженное состояние, близкое к чистому изгибу. Материал образца – малоуглеродистая сталь, поперечное сечение образца – тонкостенный коробчатый профиль. Способ записи колебаний основан на записи перемещения пятна лазерного луча на экране, что полностью исключает потери энергии, связанные с контактом лабораторной установки с записывающим устройством. Для сведения к минимуму потерь энергии в местах крепления предложено устанавливать опоры в точках покоя. Точки покоя определяются при помощи конечно-элементного расчета с рассмотрением свободных колебаний незакрепленной модели, что и реализовано в работе. **Результаты.** Как пример приводятся кривые затуханий, которые демонстрируют весьма малый логарифмический декремент колебаний и частотную независимость внутреннего трения. Основным результатом работы являются опробованные усовершенствования экспериментальной методики, среди которых основным является использование точек покоя для определения мест закрепления лабораторной установки.

**Ключевые слова:** экспериментальное определение внутреннего трения в материале; лабораторная экспериментальная установка; определение точек покоя методом конечных элементов; минимизация потерь энергии в опорных точках; логарифмический декремент колебаний; частотная независимость внутреннего трения

## Для цитирования

Зылев В.Б., Платнов П.О. Использование точек покоя при экспериментальном изучении внутреннего трения в материале // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 399–404. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404>

## Введение

Внутреннее трение является важным параметром материала, оказывающим значительное влияние на напряженно-деформированное состояние

конструкций при динамическом нагружении [1–3]. Вопросам учета внутреннего трения в настоящий момент уделяется большое внимание, наиболее часто оно вводится в расчет благодаря различным математическим алгоритмам и методикам [4–7]. Однако изучению внутреннего сопротивления опытным путем уделяется намного меньше внимания [8], несмотря на отсутствие достаточной экспериментальной обоснованности математических моделей. В данной статье предложено определять параметры внутреннего сопротивления материала путем рас-

Зылев Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики.  
Платнов Павел Олегович, аспирант, кафедра строительной механики.

© Зылев В.Б., Платнов П.О., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

смотрения затухающих колебаний в лабораторной установке. Чтобы изучить именно свойства материала, необходимо максимально уменьшить трение, связанное с другими факторами демпфирования, основными из которых являются: трение в опорных частях; рассеяние энергии через опорные части в виде волн деформаций, уходящих в основание; трение в сочленениях; силы сопротивления воздушной среды; силы сопротивления в приборах, записывающих колебания. При выполнении экспериментов в лаборатории РУТ (МИИТ) мы пришли к использованию точек покоя, которые позволяют ослабить гашение колебаний через опорные части.

### 1. Методика исследований

Задача по устранению негативного влияния распространения волн деформаций, исходящих от опорных закреплений при колебательном процессе, сводилась к определению местоположения точек покоя. Нахождение неподвижных точек конструкции могло быть реализовано различными способами. Мы рассматривали первую форму собственных колебаний незакрепленной системы, которую определяли с использованием метода конечных элементов расчетным путем, однако данная методика в принципе справедлива и для других форм собственных колебаний.

После того как форма собственных колебаний была получена расчетным путем, осуществлялся поиск точек конструкции, не имеющих линейных перемещений. Далее будем называть их точками покоя. При размещении в этих местах опорных закреплений, препятствующих поступательным перемещениям, обеспечивается сохранение частоты и формы собственных колебаний, а также сведение к минимуму динамических составляющих опорных реакций и, как следствие, потерь энергии за счет волн, уходящих в основание.

Положение точек покоя, справедливое для одной формы собственных колебаний, нуждается в переопределении при рассмотрении других форм. Помимо вышесказанного, следует еще отметить, что точки покоя остаются неизменными лишь при малых линейных колебаниях. Далее перейдем к описанию нашей экспериментальной установки.

Установка состоит из испытуемого стержня, расположенного горизонтально, и прикрепленных к его концам идентичных весьма жестких стальных плит. Поперечное сечение стержня коробчатое,  $4 \times 2$  см, с толщиной стенок 1,5 мм. Жесткие плиты имеют толщину 5,5 см и массу 71 кг каждая. Объединение стержня и плит происходит притя-

гиванием друг к другу шпильками М12 через накладку толщиной 16 мм.

Внутри образца с коробчатым поперечным сечением помещаются стальные вставки, изготовленные точно по размерам внутренней полости образца с таким расчетом, чтобы при затягивании шпилек верхняя и нижняя полки образца сжимались и создавалось крепление, близкое к глухой заделке.

Использовался стержень длиной пролета 278 см. Объединенная конструкция вывешивалась на стальных канатах, которые обеспечивали возможность небольших продольных перемещений, неизбежных при изгибе образца. Это обусловлено тем, что в реальном эксперименте мы всегда имеем малые, но все же конечные перемещения. Если допустить, что образец изгибается по окружности, и при этом в крайних волокнах возникает напряжение порядка  $2000 \text{ кг/см}^2$ , то можно определить сближение крайних точек образца. Несложные вычисления приводят к значению порядка 0,9 см для сближения крайних в пролете точек за счет искривления его оси. Отметим, что линейный расчет никак не фиксирует это перемещение, и оно будет уменьшаться с уменьшением амплитуды колебаний.

В местах крепления тросов к плитам при колебаниях также будет возникать нежелательная утечка энергии за счет их изгиба, поэтому для эксперимента были смонтированы блоки с подшипниками качения, на которые одевались тросы.

Для данной экспериментальной установки предусмотрена возможность изменения длины пролета образца, а также добавления дополнительных масс, которые крепятся к жестким плитам через шпильки с гайками. Система присоединения образца к плитам позволяет использовать стержни с другими размерами поперечного сечения.

Установка позволяет сдвигать точки подвеса по горизонтали, что дает возможность устанавливать их в точках покоя. При любой модификации первоначальной системы неизбежно меняются частота и форма собственных колебаний и, следовательно, положение точек покоя, которое придется определить новым расчетом.

Компьютерная модель установки и исследуемая форма колебаний приведены на рис. 1.

Наличие трения о воздух при колебаниях конструкции вызывает нежелательное затухание. Оценка величины влияния сопротивления среды была произведена в работе [9] при помощи численного моделирования нелинейных колебаний. Схема крепления коробчатого образца в работе [9] была консольной, однако сечение образца было тем же, что и в настоящей работе. Также близкими были и частоты затухающих колебаний. Все

это позволяет высказать предположение о том, что силами сопротивления воздуха в рассматриваемом здесь случае можно пренебречь или, по крайней мере, оценивать их как пренебрежимо малые.

Также дополнительное рассеяние энергии может возникать при записи процесса затухания. При использовании различных записывающих устройств происходит контакт этого устройства с образцом, что сказывается на всем колебательном процессе. В наших экспериментах мы используем оптический метод – лазерная указка проецирует колебания на экран, при этом никаким образом не влияя на затухание.

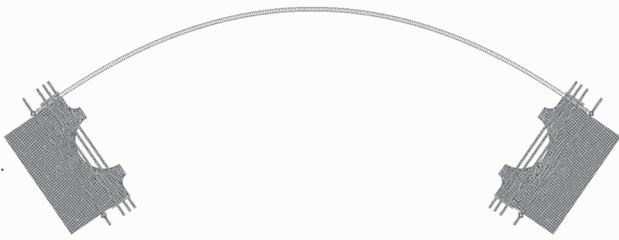


Рис. 1. Форма собственных колебаний, используемая в экспериментах

[Figure 1. The form of natural oscillations used in experiments]

Форма колебаний, изучаемая в экспериментах, приведена на рис. 1. Чтобы определить положение неподвижных точек системы, было выполнено моделирование конструкции в программно-расчетном комплексе Femap with NX Nastran. Особенностью модели является отсутствие в ней опорных закреплений. Состоит модель из стержневых (bar) и пластинчатых (plate) конечных элементов размером 4 мм. Всего модель включает в себя 26 204 конечных элемента.

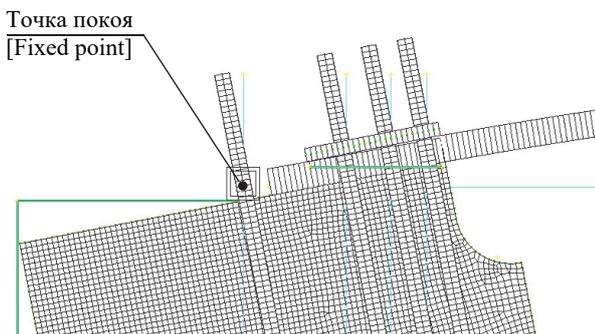


Рис. 2. Фрагмент конструкции с точкой покоя, которая легко определяется при рассмотрении формы колебаний  
[Figure 2. A fragment of a construction with a fixed point that is easily determined by considering the form of natural oscillations]

Поиск точек покоя проводился визуально при рассмотрении анимации собственных колебаний

исследуемой формы с многократным увеличением масштаба изображения. Найденные неподвижные точки по высоте находились практически на нейтральной оси испытываемого стержня. Фрагмент колебаний конструкции при определении положения точки покоя показан на рис. 2.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

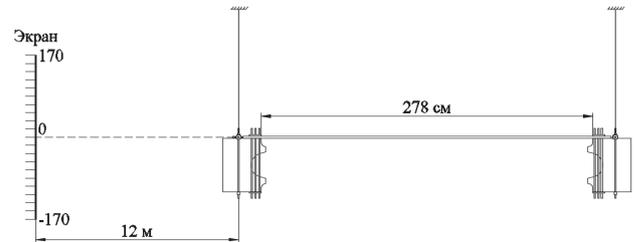


Рис. 3. Экспериментальная установка, подвешенная на тросах (расстояние до экрана на рисунке дано не в масштабе)  
[Figure 3. Experimental model hanging on steel cables (the distance to the screen in the figure is not giving in scale)]

Вертикальный экран расположен на расстоянии 12 м по направлению вдоль стержня от ближайшей к экрану точки покоя. Экран расчерчен с шагом в 10 см между отметками –170 и 170 см.

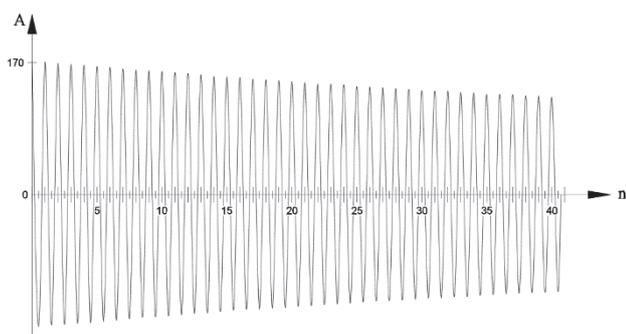
При выведении стержня из положения равновесия по исследуемой форме в нем появляется деформация, весьма близкая к чистому изгибу, что было проверено расчетным путем. Также было определено, что, когда лазерное пятно попадает на отметку 170 см, в крайних волокнах образца возникают напряжения  $2000 \text{ кг/см}^2$ . В качестве расчетного допущения мы приняли, что угол поворота точки подвеса пропорционален смещению лазерного пятна на экране по вертикали при равномерно расчерченной шкале. Питание лазера осуществлялось от батареи, таким образом колебания не стеснялись проводами.

Как недостаток рассматриваемой методики можно отметить то обстоятельство, что образец имеет стенки, в пределах которых эпюра меняется по линейному закону, что приводит к занижению параметров демпфирования материала. Идеал, к которому надо стремиться, имеет место при одноосном растяжении. Рассматриваемый нами чистый изгиб лишь приближается к этому идеалу.

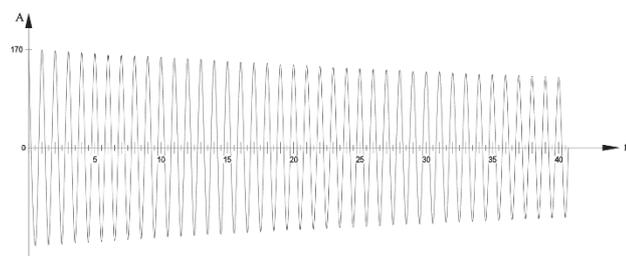
Далее выполняется запись движения лазерного луча на видеокамеру. Записанные колебания имеют частоту, хорошо совпадающую с теоретической, что подтверждает удовлетворительное качество экспериментальной формы и конечно-элементной модели. Способ записи колебаний, описанный выше, ранее был использован в работах [9; 10].

## 2. Результаты исследований

Было проведено два эксперимента для длины пролета стержня 278 см. Во втором случае мы уменьшали частоту собственных колебаний путем добавления грузов к системе. Грузы по 5 кг крепились к жестким плитам при помощи шпилек и плотно притягивались гайками. На каждую плиту было навешено по 40 кг. После этого точки покоя выставлялись в новое положение.



**Рис. 4.** График затухания колебаний конструкции при  $v_1^e = 2,22$  Гц (установка без дополнительных грузов)  
**[Figure 4.** The graph of the damped oscillations at frequency  $v_1^e = 2,22$  Hz (model without additional weights)]



**Рис. 5.** График затухания колебаний конструкции при  $v_2^e = 1,58$  Гц (установка с дополнительными грузами)  
**[Figure 5.** The graph of the damped oscillations at frequency  $v_2^e = 1,58$  Hz (model with additional weights)]

После анализа видеозаписей были построены графики затухания для первых 40 циклов колебаний для обоих случаев. Графики представлены на рис. 4 и 5. Также были получены экспериментальные значения технических частот собственных колебаний для двух случаев. Они оказались равны  $v_1^e = 2,22$  Гц,  $v_2^e = 1,58$  Гц. Разность частот, как видно, достаточно значительная для того, чтобы могла проявиться частотная зависимость внутреннего трения в соответствии с теорией Фойгта.

По графикам видно, что затухание колебаний происходит слабо. В обоих рассмотренных случаях амплитуда за один цикл убывает менее чем на 1 % ( $\approx 0,9$  %). Это говорит о том, что доля затухания, относящаяся к внутреннему сопротивлению материала, есть крайне небольшая величина.

Логарифмические декременты с осреднением по первым 40 циклам оказались равными  $\delta_1^{40} = 0,0076$ ,  $\delta_2^{40} = 0,0082$ . Отсюда можно сделать вывод, что величина логарифмического декремента почти не зависит от частоты колебаний, что противоречит гипотезе Фойгта, что также отмечалось рядом специалистов [11–15]. Кроме того, при сильном уменьшении амплитуды декремент колебаний резко уменьшается. Отметим, что в обоих исследованных случаях полное затухание колебаний не наступало и через 10 минут наблюдения (в этот момент времени запись прекращалась).

## Выводы

Точки покоя легко определяются теоретическим путем, и их использование можно рекомендовать в экспериментах по внутреннему трению.

Для обычной малоуглеродистой стали декремент колебаний оказался небольшим (около 0,008) и практически независимым от частоты колебаний при максимальных напряжениях цикла порядка предела упругости.

## Список литературы

1. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Внутреннее трение при продольных колебаниях троса // Вестник Балтийского федерального университета имени И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2017. № 3. С. 84–92.
2. Read T.A. The internal friction in single metal crystals // Physical review. 1940. Vol. 58. Pp. 371–380.
3. Вронская Е.С. Динамический расчет призматических систем с учетом внутреннего трения // Градостроительство и архитектура. 2017. № 3. С. 24–27.
4. Хромов В.Г., Хромов И.В., Хромов Е.В. Методика определения интегрального коэффициента внутреннего трения для поперечных колебаний стержня // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 3. С. 3–7.
5. Вешкин М.С., Гребенюк Г.И. Об использовании комплексной модели внутреннего трения в расчетах стержневых систем на импульсные воздействия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 5. С. 5–17.
6. Сеницкий Ю.Э. Об учете сил внутреннего трения в нестационарных задачах динамики // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность. 2017. С. 182–186.
7. Novick A.S. Variation of amplitude-dependent internal friction in single crystals of copper with frequency and temperature // Physical review. 1950. Vol. 80. No. 2. Pp. 249–257.
8. Хромов О.В. Экспериментальное исследование характеристик внутреннего трения стальных спираль-

ных канатов и проволоки // Труды Одесского политехнического университета. 2009. № 1. С. 32–35.

9. Платнов П.О. Эксперимент по проверке частотной независимости внутреннего трения // Аспирантские чтения: сборник научных статей аспирантов ИПСС РУТ (МИИТ). 2018. С. 66–70.

10. Зылев В.Б., Григорьев Н.А. Обобщенная модель Прандтля для учета сил внутреннего трения // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 11. С. 58–62.

11. Давиденков Н.Н. Обзор о рассеянии энергии при вибрациях // Журнал технической физики. 1938. Т. 8. Вып. 6. С. 483–499.

12. Писаренко Г.С. Колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале. Киев: Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1955. 240 с.

13. Сорокин Е.С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания // Исследования по динамике сооружений. 1951. С. 5–90.

14. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 154 с.

15. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. 193 с.

RESEARCH PAPER

## The use of fixed points in experimental research of the internal friction of material

Vladimir B. Zylev, Pavel O. Platnov\*

Russian University of Transport, 9 Obratsova St., Moscow, 127994, Russian Federation

\*zylev@ya.ru

### Article history:

Received: May 11, 2019

Revised: October 04, 2019

Accepted: October 10, 2019

### Abstract

**The aim of the work.** The work is devoted to experimental research of internal friction parameters of the material. **Methods.** The research of internal friction is carried out by consideration of damped oscillations of the experimental system that consist of rigid plates and a specimen in a state of pure bending. We propose to locate bearings in the fixed points to minimize energy losses in support fastenings. Fixed points are determined by using a finite element complex with consideration of free oscillations of the loose model. **Results.** Damping curves were determined, which demonstrate a very small logarithmic decrement of oscillations and frequency independence of inertial friction. The main result of the work is the tested improvements of the experimental technique, among which the main one is the use of fixed points for determining the places of fastening of the laboratory installation

**Keywords:** experimental determination of internal friction in a material; laboratory experimental model; determination of fixed points by finite element method; minimization of energy losses in support fastenings; logarithmic decrement of oscillations; frequency independence of inertial friction

### For citation

Zylev V.B., Platnov P.O. (2019). The use of fixed points in experimental research of the internal friction of material. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(5), 399–404. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404>. (In Russ.)

### References

1. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. (2017). Vnutrennee trenie pri prodol'nyh kolebaniyah trosa [The internal friction in longitudinal oscillations of the wire rope]. *Journal of I. Kant Baltic Federal University. Series: Physical, Mathematical and Technical Sciences*, (3), 84–92. (In Russ.)

2. Read T.A. (1940). The internal friction in single metal crystals. *Physical review*, 58, 371–380.

3. Vronskaya E.S. (2017). Dinamicheskij raschet prizmaticheskikh sistem s uchetom vnutrennego treniya [Dynamic calculation of prismatic systems taking into account inter-

nal friction]. *Urban planning and architecture*, (3), 24–27. (In Russ.)

4. Khromov V.G., Khromov I.V., Khromov E.V. (2016). Metodika opredeleniya integral'nogo koeffitsienta vnutrennego treniya dlya poperechnykh kolebanij sterzhnya [Method of determining integral coefficient of internal friction for transverse vibrations of a rod]. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, (3), 3–7. (In Russ.)

5. Veshkin M.S., Grebenyuk G.I. (2019). Ob ispol'zovanii kompleksnoj modeli vnutrennego treniya v raschetakh sterzhnevnykh sistem na impul'snye vozdeystviya [On the use of the complex model of internal friction in calculation of rod systems on pulse impacts]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*, (5), 5–17. (In Russ.)

6. Senitskiy Y.E. (2017). Ob uchete sil vnutrennego treniya v nestacionarnykh zadachah dinamiki [About the ac-

Vladimir B. Zylev, Doctor of Science (Technical), Professor, Head of the Department of Structural Mechanics.

Pavel O. Platnov, PhD student of the Department of Structural Mechanics.

count of internal friction forces in non-stationary problems of dynamics]. *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Natural Sciences and Technosphere Safety* (pp. 182–186). (In Russ.)

7. Novick A.S. (1950). Variation of amplitude-dependent internal friction in single crystals of copper with frequency and temperature. *Physical review*, 80(2), 249–257.

8. Khromov O.V. (2009). Eksperimental'noe issledovanie harakteristik vnutrennego treniya stal'nyh spiral'nyh kanatov i provoloki [Experimental research of internal friction characteristics of steel spiral ropes and wires]. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, (1), 32–35. (In Russ.)

9. Platnov P.O. (2018). Eksperiment po proverke chasotnoj nezavisimosti vnutrennego treniya [Experimental verification of the frequency independence of internal friction]. *Postgraduate recitations: collection of scientific articles of RUT postgraduates* (pp. 66–70). (In Russ.)

10. Zylev V.B., Grigor'ev N.A. (2011). Obobshchennaya model' Prandtlya dlya ucheta sil vnutrennego treniya [Generalized Prandtl model for the account of internal friction forces]. *Construction mechanics and calculation of structures*, (11), 58–62. (In Russ.)

11. Davidenkov N.N. (1938). Obzor o rasseyanii energii pri vibratsiyakh [Overview of energy dissipation in vibrations]. *Journal of Technical Physics*, 8(6), 483–499. (In Russ.)

12. Pisarenko G.S. (1955). *Kolebaniya uprugih sistem s uchetom rasseyaniya energii v materiale* [Oscillations of elastic systems taking into account the energy dissipation in the material]. Kiev: Akademiya nauk Ukrainskoj SSR Publ. (In Russ.)

13. Sorokin E.S. (1951). Metod ucheta neuprugogo soprotivleniya materiala pri raschete konstruktsii na kolebaniya [Method of accounting for inelastic resistance of the material in the calculation of structures under vibrations]. *Research on the dynamics of structures* (pp. 5–90). (In Russ.)

14. Sorokin E.S. (1960). *K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyah uprugih sistem* [On the theory of internal friction at oscillations of elastic systems]. Moscow: Gosstroyizdat Publ. (In Russ.)

15. Panovko Ya.G. (1960). *Vnutrennee trenie pri kolebaniyah uprugih sistem* [The internal friction at oscillations of elastic systems]. Moscow: Izdatel'skij dom fiziko-matematicheskoy literatury Publ. (In Russ.)