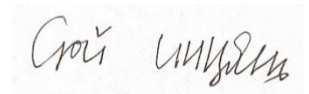


На правах рукописи



СЮЙ ИНЦЯНЬ

**НЕЛИНЕЙНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И СРЕД**

Специальность 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань - 2020

Работа выполнена на кафедре теоретической механики института математики и механики им. Н.И. Лобачевского ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
доцент Бережной Дмитрий Валерьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры теоретической и
строительной механики ФГБОУ ВО
«Вятский государственный университет»
Шишкин Виктор Михайлович

кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры механики
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»
Шакирзянов Фарит Рашитович

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный
технический университет КНИТУ-КАИ
им. А.Н. Туполева»

Защита состоится 17 сентября 2020 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного Совета КФУ.01.07 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 35, ауд. 610.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского (Приволжского) федерального университета. Электронный вариант диссертации и автореферата размещен на сайте <http://www.kpfu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент



Саченков А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Разработка новых эффективных методик расчета взаимодействующих между собой вязкоупругих и упругопластических элементов трехмерных конструкций и сплошных сред при термосиловом нагружении по-прежнему является актуальной проблемой механики деформируемого твердого тела. Взаимодействия пространственных промышленных конструкций и объектов транспортной инфраструктуры между собой и окружающими их грунтом при упруговязкопластическом деформировании имеют место в разнообразных технологических процессах в авиастроении, промышленном и транспортном строительстве и других отраслях техники. Однако такого рода процессы при моделировании нелинейного деформирования элементов промышленных и транспортных сооружений и окружающих их различного рода грунтовых сред в настоящее время остаются еще недостаточно изученными. Это обусловлено сложными процессами вязкоупругого и упругопластического деформирования таких элементов конструкций при их контактном взаимодействии между собой и окружающими их грунтовыми средами в условиях термосилового нагружения, зарождением и развитием зон, где превалируют пластические деформации, большими перемещениями и деформациями, а также рядом других факторов.

Поэтому на современном этапе развития науки актуальными остаются постановки такого рода задач, разработка и реализация новых и разнообразных методик их решения.

Цели диссертационной работы:

- разработка новых вычислительных моделей и алгоритмов взаимодействия упруговязкопластических пространственных элементов конструкций и грунтовых сред;
- разработка согласованных трехмерных конечных элементов упруговязкопластической сплошной среды, а также алгоритмов их контактного взаимодействия;
- разработка нового подхода к решению задач вычисления напряжений в кинетических накопителях энергии, выполненных с натяжением слагающих их слоев;
- разработка и реализация пакета прикладных программ, позволяющего проводить численное моделирование процесса нелинейного деформирования взаимодействующих между собой элементов трехмерных конструкций и грунтовых сред при термосиловом нагружении.

Научную новизну работы составляют следующие положения:

На основе определяющих соотношений между приращениями «истинных» напряжений и «истинных» деформаций и напряжений в рамках геометрически нелинейной теории упругости развиты вычислительные модели упруговязкопластического деформирования взаимодействующих между собой элементов пространственных конструкций и геологических сред сложной физической природы.

Реализованы соответствующие конечно-элементные методики численного моделирования процессов контактного взаимодействия элементов конструкций промышленного приборостроения и объектов строительства и различного рода грунтов.

Решены многочисленные тестовые и модельные задачи, проведено сравнение результатов их решения с результатами, полученными по имеющимся методикам и из эксперимента.

Решен ряд новых задач, в том числе с учетом контактного взаимодействия, нелинейного упруговязкопластического деформирования трехмерных тел и грунтовых массивов при сложном термосиловом нагружении, выявлены качественные и количественные закономерности их деформирования.

Разработан новый подход к решению задач вычисления напряжений в кинетических накопителях энергии, выполненных с натяжением слагающих их слоев, решен ряд модельных задач.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается строгими математическими постановками рассматриваемых задач и обоснованным применением математических методов; совпадением численных результатов ряда тестовых задач с опубликованными в литературе; сходимостью приближенных решений при сгущении конечно-элементной сетки; тщательностью отладки и тестирования программ для ЭВМ.

Практическая ценность. Разработанные методики, алгоритмы, программное обеспечение и результаты решения научно-исследовательских задач, приведенные в диссертации, внедрены в расчетную практику ряда научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций и использовались на этапах проектирования и научного сопровождения, что подтверждается научными отчетами и публикациями в открытой печати.

Основные положения, выносимые на защиту.

- алгоритм решения геометрически нелинейных трехмерных задач деформирования упруговязкопластической сплошной среды при термосиловом нагружении, реализованный на базе определяющих уравнений между приращениями «истинных» напряжений и «истинных» деформаций;

- конечно-элементная методика решения трехмерных контактных задач механики деформируемого твердого тела для различной дискретизации взаимодействующих сред;

- новый подход к решению задач повышения энергоемкости супермаховиков, выполненных с натягом слоев;

- результаты решения ряда задач трехмерного деформирования контактирующих между собой упруговязкопластических элементов конструкций, объектов транспортного строительства и грунтовых массивов сложной физической природы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- XXIV-XXVI Международных Симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», Кременки, 2018-2020 годы;

- XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 2018 год;

- XVII Всероссийской молодежной научной школе-конференции «Лобачевские чтения», Казань, 2018 год;

- Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2019» (ICMTMTE 2019), Севастополь, 2019 год;

- XII Международной научной конференции «Сеточные методы для краевых задач и приложения», Казань, 2018 год;

- научном семинаре кафедры теоретической механики Казанского (Приволжского) федерального университета, 2020 год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, определенных ВАК для публикации содержания кандидатских диссертаций, 3 статьи в изданиях, индексируемых WoS/Scopus, 5 материалов и тезисов докладов конференций.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации. Все основные результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии на всех этапах исследований. Основные идеи построения определяющих физических соотношений, связывающих приращения «истинных» напряжений и деформаций, принадлежат д.ф.-м.н., профессору Паймушину В.Н. и научному руководителю д.ф.-м.н., доценту Бережному Д.В.

Автор принимал участие в получении всех основных результатов диссертационного исследования на всех этапах исследований.

Автор принимал непосредственное участие в реализации конечно-элементного алгоритма решения контактных задач, построении семейства контактных элементов для стыковки трехмерных сред с разной степенью дискретизации.

Автором решены новые практические задачи: задача деформирования элементов заклепочного соединения элементов титановой и углепластиковой ступенчатых пластин; задача деформирования ротора в перспективных моделях супермаховиков; задача вязкоупругого и упругопластического деформирования элементов фрикционного разъема в процессе его изготовления и эксплуатации; задачи деформирования расположенной в грунтах сложной

физической природы обделки тоннеля при термосиловом нагружении.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 127 страницах, содержит 81 рисунок, 5 таблиц. Библиография включает 187 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы цели, представлены выносимые на защиту научные положения, приводится обзор публикаций по теме диссертации.

Отмечается, что основополагающие вопросы нелинейной теории упругости содержатся в работах В.В. Новожилова, Д. Адкинса, С.В. Бакушева, А. Грина, К. Трусделла, А.Н. Гузя, Л.М. Зубова, А.И. Лурье, Х.М. Муштари, К.З. Галимова, В.Н. Паймушина, В.И. Шалашилина, Л.И. Седова, Л.А. Толоконникова, К.Ф. Черных и многих других исследователей. Так же можно отметить ряд авторов, занимавшихся вопросами нелинейной механики деформируемого тела и строительной механики: И.И. Гольденблатта, А.Э. Грина, Г. Гриоли, А.А. Ильюшина, Л.С. Лейбензона, А. Надаи и др.

Вопросы теории пластичности подробно изложены в работах таких авторов, как А.А. Гвоздев, Д. Друкер, А.А. Ильюшин, А.Ю. Ишлинский, Л.М. Качанов, В.В. Соколовский, В. Прагер, Р. Хилл, Ф. Ходж и многих других. Хорошо известны работы таких ученых, как Р.А. Арутюнян, А.А. Вакуленко, В.Г. Баженов, Н.И. Безухов, Г.А. Гениев, И.И. Гольденблат, В.А. Копнов, М.И. Ерхов, В.Г. Зубчанинов, Д.Д. Ивлев, С.А. Капустин, Ю.Г. Коротких, В.Н. Кукуджанов, Ю.В. Немировский, З. Мруз, П. Пежина, В. Прагер, Ф. Ходж, И.Г. Терегулов, Р.А. Каюмов и др.

Значительный вклад в развитие методов решения контактных задач внесли фундаментальные труды Л.А. Галина, В.И. Моссаковского, В.Л. Рвачева, А. Синьорини, И.Я. Штаермана. Следует также отметить работы В.М. Александрова, Ю.П. Артюхина, Н.Х. Арутюняна, В.А. Бабешко, И.И. Воровича, Р.В. Гольдштейна, А.Г. Горшкова, И.Г. Горячевой, В.И. Довноровича, К. Джонсона, Е.М. Морозова, А.Н. Подгорного, Г.Я. Попова, В.С. Саркисяна, В.М. Сеймова, М.И. Теплового и многих других.

Идеи приближенных методов вычисления, на которых базируется МКЭ, были сформулированы в трудах Дж. Аргириса, М. Тернера, Р. Клафа. Развитие метода получило в работах О.К. Зенкевича, Дж.Т. Одена, Л. Сегерлинда, Д. Норри и Ж. Фриза и др. Значительный вклад в теорию МКЭ внесли отечественные авторы В.А. Постнов, И.Я. Хархурим, Л.А. Розин, И.Ф. Образцов, Р.Б. Рикардс, А.И. Голованов и др.

Применением конечно-элементного анализа к геометрически и физически нелинейным задачам деформируемого твердого тела занимались: Y. Basar, K.J. Bathe, A.L. Eterovic, J. Fish, T. Belytschko, A. V. Idesman, M. Kleiber, M. Rouainia, D. M. Wood, J.S. Simo, R.L. Taylor, В.Н. Кукуджанов, А.И. Голованов, Р.А. Хечумов, Х. Кепплер, В.И. Прокопьев, А.А. Роговой, Б.Д. Анин, М.В. Голдманис, С.А. Капустин, П.В. Трусков, А.И. Швейкин и др.

Решение контактных задач МКЭ с использованием специальных стыковочных элементов, моделирующих диаграмму сила — смещения на поверхностях раздела взаимодействующих тел, принадлежит R.E. Goodman, R.J. Taylor, T.A. Brekhet, которые для моделирования трещин и швов горных пород применили разрывные контактные элементы. Дальнейшее усовершенствование контактных элементов проводилось в работах А.В. Оробинского, А.П. Паутова, О.И. Солуянова, Э.В. Рыжова, В.И. Сакало, Ю.П. Подлеснова, J. Jamada, N. Joshimura, T. Sasurai, A. Scholes, E. M. Strover и др.

Есть работы, в которых рассматривались некоторые вопросы контактного взаимодействия упругопластических элементов конструкций и сред и, в частности, были сделаны попытки решения задачи деформирования клинч-соединений. К ним можно отнести работы Л.И. Кренёва, С.М. Айзиковича, Б.И. Митрина, С.И. Евтушенко, Т.А. Крахмального, М.А. Шубина, В.Н. Синякова, А.В. Сосова, А.В. Никитина, А.Д. Картунова, Е.М. Третьякова, J. Mucha, W. Witkowski, J. Flodr, P. Kałduński, M. Krejsa, P. Pařenica, S. Coppieters, H. Zhang, F. Xu, N.

Vandermeiren, A. Breda, D. Debruyne, F. Lambiase, D.C. Ko.

Фундаментальные труды по термоупругости принадлежат зарубежным и отечественным ученым Дж. Дюгамелю, Ф.Е. Нейману, М.А. Био, В. Новацкому, Х. Зорскому, Я.С. Подстригачу, А.Д. Коваленко, В.А. Ломакину, Ю.М. Коляно, В.А. Крысько, П.Ф. Недорезову и многим другим. Связанным задачам термовязкоупругости посвящены монографии В.Г. Карнаухова, В.Ф. Грибанова и Н.Г. Паничкина.

Решения упруговязкопластических задач получали многие авторы, упомянем работы Н.Х. Арутюняна, Д.Д. Ивлева, Л.М. Качанова, Н.Н. Малинина, Г.С. Писаренко, Ю.Н. Работнова, И.Е. Проковича, А.Р. Ржаницына. Задачи деформирования вязкопластических сред решались М.Ю. Абелевым, С.Е. Александровым, С.Л. Баженовым, А.А. Бурениным, Д.В. Георгиевским, А.А. Ильюшиным, Г.И. Быковцевым, И.Э. Келлером и многими другими.

В первой главе описывается построение определяющих соотношений между приращениями «истинных» деформаций и «истинных» напряжений, реализован алгоритм решения трехмерной вариационной задачи, описана конечно-элементная методика решения трехмерных задач деформирования упруговязкопластических элементов пространственных конструкций и грунтовых сред при сложном термическом и силовом нагружении. Развита и усовершенствована конечно-элементная методика решения неизотермических трехмерных задач с односторонним контактом, построено семейство специальных контактных элементов, позволяющее стыковать контактирующие поверхности с разной степенью разбивки на конечные элементы.

Истинными деформациями удлинений ε_i и сдвигов $\sin \gamma_{ij}$ назовем величины

$$\varepsilon_{ii}^{tr} = \varepsilon_i = dl_i^* / dl_i - 1 = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{ii}} - 1,$$

$$\varepsilon_{ij}^{tr} = \sin \gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij} (1 + 2\varepsilon_{ii})^{-\frac{1}{2}} (1 + 2\varepsilon_{jj})^{-\frac{1}{2}} = 2\varepsilon_{ij} (1 + \varepsilon_i)^{-1} (1 + \varepsilon_j)^{-1},$$

а истинными напряжениями, отнесенными к единицам деформированных площадей S_i^* , по В.В. Новожилову являются компоненты векторов σ_i в представлениях $\sigma_i = \sigma_{ij} \mathbf{e}_j^*$, где $\mathbf{e}_j^* = \mathbf{R}_j^* / |\mathbf{R}_j^*| = (1 + \varepsilon_j)^{-1} (\delta_{ji} + e_{ji}) \mathbf{e}_i$ – единичные векторы, направленные по касательным к деформированным координатным линиям в точке $M^*(x^i)$, в которую переходит точка $M(x^i)$ после деформирования; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций Коши-Грина.

Для вариации потенциальной энергии деформаций имеем

$$\delta \Pi = \iiint_{V_0} (\tau_1 \delta \varepsilon_1 + \tau_2 \delta \varepsilon_2 + \tau_3 \delta \varepsilon_3 + \tau_{21} \delta \sin \gamma_{21} + \tau_{13} \delta \sin \gamma_{31} + \tau_{32} \delta \sin \gamma_{23}) (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) dV_0,$$

где $\tau_1 = \frac{\sigma_{11} \cos \gamma_{23}}{1 + \varepsilon_1} + \sigma_{21} \cos \gamma_{13} \sin \gamma_{12} + \sigma_{31} \cos \gamma_{12} \sin \gamma_{13}$, $\tau_{21} = \sigma_{21} \cos \gamma_{13} = \sigma_{12} \cos \gamma_{23} = \tau_{12}$; $\overline{1, 2, 3}$.

В качестве условия пластичности в работе используется критерий Губера-Мизеса, для которого функция текучести $F \equiv \sigma_i - c = \sigma_i - H(\chi, T) = 0$, где σ_i – интенсивность истинных напряжений, H – монотонно возрастающая положительная функция, аппроксимирующая истинную диаграмму деформирования материала. Уравнения типа Прандтля–Рейса связывают компоненты приращений истинных напряжений σ_{ij} и истинных деформаций ε_{ij}^{tr}

$$\Delta \sigma_{ij} = \frac{E}{1 - 2\mu} \delta_{ij} \Delta \varepsilon_0^{tr} + 2G \Delta \varepsilon_{ij}^{tr} - \alpha \frac{3G \sum_{k,l} \sigma'_{kl} \Delta \varepsilon_{kl}^{tr}}{(\sigma_i)^2 (H'_\chi / 3G + 1)} \sigma'_{ij},$$

где $\Delta \varepsilon_0^{tr}$ – приращение средней истинной деформации, $\Delta \varepsilon_{ij}^{tr}$ – приращения компонент истинных деформаций, σ'_{ij} – компоненты девиатора напряжений, $\tau_i = \sigma_i / \sqrt{3}$ – интенсивность ка-

сательных напряжений, δ_{ij} – символ Кронекера, μ – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига, E – модуль Юнга, $K = E/(3(1-2\mu))$.

При решении упруговязкопластических задач была выбрана модель упруговязкопластического тела по Оджвисту с определяющим уравнением вида

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tr} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{tre} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{trp} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{trv}.$$

Для скоростей вязких деформаций использовалась модель вида

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{trv} = a \left(\sqrt{3J_2} \right)^M e^{Kt} \frac{\sqrt{3\bar{s}}}{2J_2^{1/2}},$$

где a, M, K – константы материала, $\bar{s}$ – девиатор, J_2 – второй инвариант тензора напряжений.

Механизм контактного взаимодействия деформируемых конструкций реализуется за счет введения в расчетную схему специального контактного слоя, который обладает специфическими механическими свойствами. Этот слой может быть реальным, как например, клей, прорезиненная и картонная прокладка между бетонными блоками, так и фиктивным. Внешние силовые воздействия на контактирующие поверхности определяют различные возможности взаимодействия контактирующих поверхностей между собой.

I случай. Будем считать, что внешние нагрузки приводят только к обжатию контактного слоя. В этом случае в контактном слое реализуются напряжения обжатия $\sigma_H = \sigma_A = \sigma_B$, которые вызывают деформацию обжатия $\varepsilon_H = \sigma_H/E_H$. Вводится параметр E_H , определяющий модуль Юнга материала контактного слоя. Величины σ_A и σ_B определяют нормальные напряжения на контактирующих поверхностях. Через H_0 обозначим начальную толщину слоя контакта, а через H определим расстояние между поверхностями контакта. В этом случае можно ввести условие $H \leq H_0$, которое будет условием возникновения напряжений обжатия в слое.

II случай. Если есть предварительное обжатие ($H \leq H_0$), внешние усилия приводят к не приводящему к отрыву расхождению контактных поверхностей, то можно использовать соотношения вида

$$\sigma_H = \sigma_A = \sigma_B, \quad \varepsilon_H = \sigma_H/E_H$$

При отрыве контактирующих поверхностей справедливо

$$H \geq H_0, \quad \sigma_H = 0$$

III случай. Если силовое воздействие отсутствует, то контактирующие поверхности свободно перемещаются и справедливы соотношения $\sigma_H = 0, H \geq (H^A + H^B)$.

IV случай. Если реализуется вариант свободного проскальзывания контактирующих поверхностей, то при этом касательные напряжения не возникают, тогда $\tau_H = 0$ при $H \geq H_0$.

V случай. Если происходит упругое обжатие контактного слоя и сдвиг без проскальзывания, то справедливы соотношения

$$\sigma_H = \sigma_A = \sigma_B, \quad \tau_H = \tau_A = \tau_B, \quad \varepsilon_H = \sigma_H/E_H, \quad \gamma_H = \tau_H/G_H$$

при $H \leq H_0$. В этом случае должно выполняться условие

$$\tau_H \leq f |\sigma_H|,$$

где f – погонный коэффициент трения.

VI случай. Если есть возможность проскальзывания, то предыдущее условие не выполняется, и в этом случае

$$\sigma_H = \sigma^A = \sigma^B, \quad \tau_H = \tau_{np} = f |\sigma_H|, \quad \varepsilon_H = \frac{\sigma_H}{E_H}.$$

Тогда нормальные напряжения обжатия σ_H и деформации обжатия, определяемые соотношением вида

$$\varepsilon = (H - H_0) / H_0,$$

будут связаны зависимостью, приведенной на рисунке 1а), а касательные напряжения τ_H и деформации сдвига γ будут связаны зависимостью, приведенной на рисунке 1б), где изображены как процессы нагрузки, так и разгрузки.

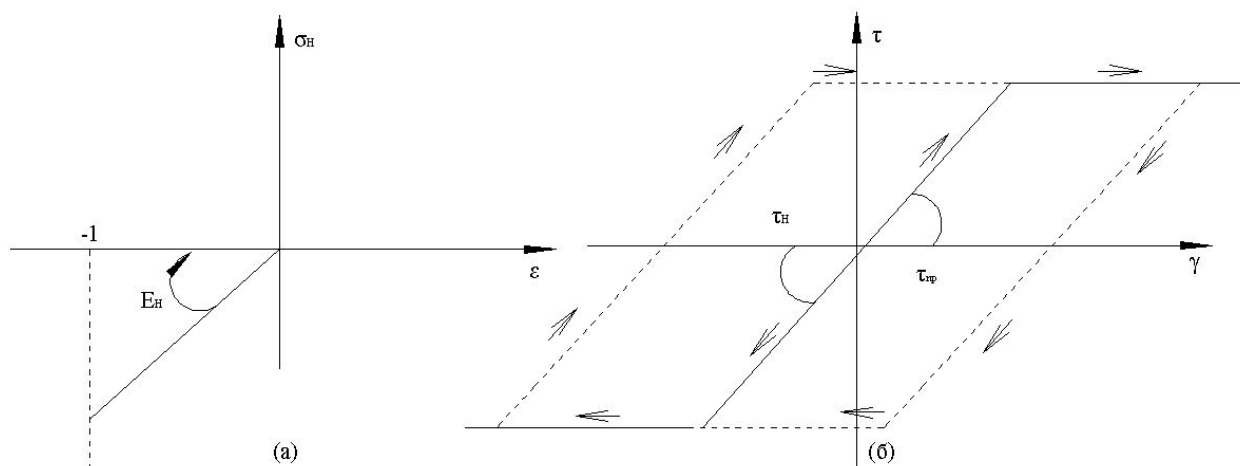


Рис. 1. Диаграммы напряжения–деформации в контактном слое:
а – для нормальных компонент; б – для касательных компонент.

Предельные касательные напряжения через коэффициент трения связаны с напряжениями обжатия по формуле вида

$$\tau_{np} = \begin{cases} f |\sigma_H|, & \text{при } \sigma_H < 0 \\ 0, & \text{при } \sigma_H \geq 0 \end{cases}$$

Характерной особенностью этой задачи являются ограничения на возможную деформацию контактного слоя и ограничения по касательным напряжениям, по которым определяется, возможно ли проскальзывание в контактном слое.

Для реализации математической модели взаимодействия деформируемых поверхностей через контактный слой в рамках МКЭ удобно определить так называемый контактный элемент с 8-ю, 6-ю, 5-ю или 4-мя узлами.

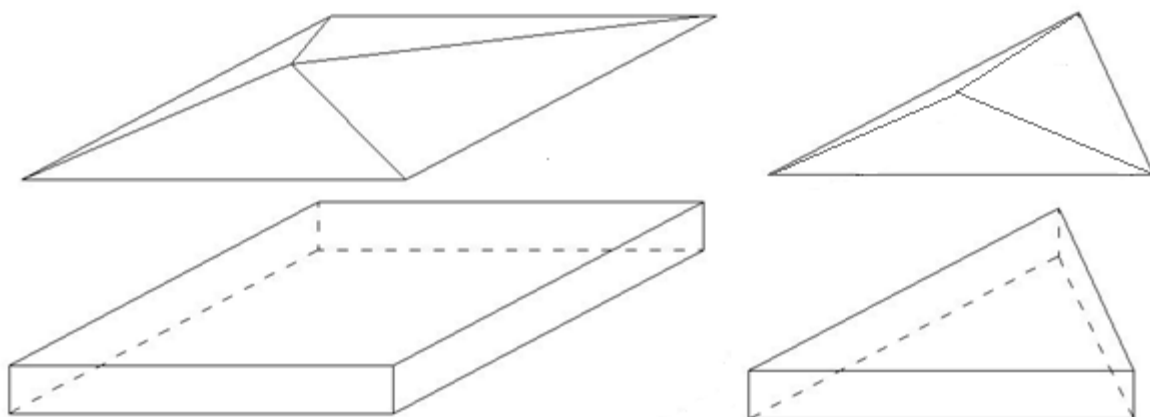


Рис. 2. Семейство контактных конечных элементов

Во второй главе решен ряд новых практических задач упруговязкопластического деформирования взаимодействующих между собой элементов трехмерных конструкций: задача вязкоупругого и упругопластического деформирования элементов фрикционного разъема в процессе его изготовления и эксплуатации; задача деформирования ротора в перспективных моделях супермаховиков; задача деформирования элементов заклепочного соединения

элементов титановой и углепластиковой ступенчатых пластин.

Упруговязкопластический расчет фрикционного разъема

На основе предложенной методики решена трехмерная задача упруговязкопластического деформирования фрикционного разъема при его создании и эксплуатации. Было исследовано влияние величины угла закручивания неподвижной части разъема при его создании и его толщины на максимальную величину усилия извлечения штыря при их разъединении, даны рекомендации по проектированию подобных фрикционных разъемов и их расчету при различных условиях эксплуатации.

На основе предложенной методики был проведен расчет упруговязкопластического деформирования статичного элемента фрикционного разъема и расчет его контактного взаимодействия со штырем (рисунок 3) при кинематическом смещении последнего.

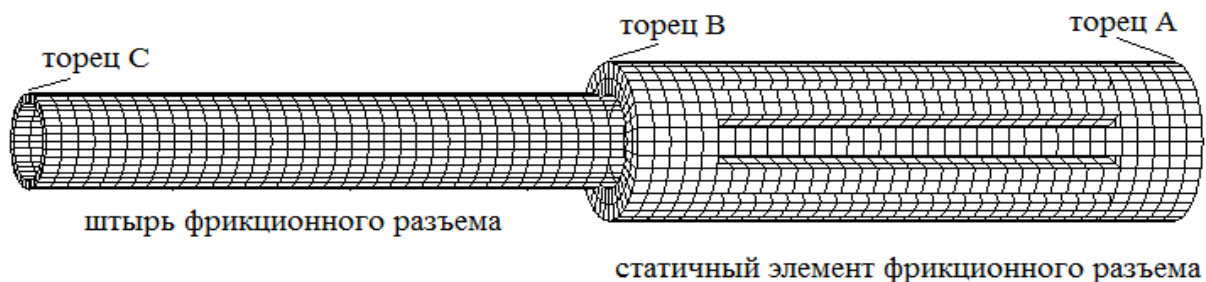


Рис. 3. Общий вид электрического фрикционного разъема

Статический элемент фрикционного разъема представляет собой толстостенный трехмерный цилиндр с 12-ю симметрично расположенными продольными секторальными прорезями (рисунок 4). Штырь разъема – толстостенный цилиндр, внешний радиус которого совпадает с внутренним радиусом статичного элемента разъема. Расчет производился в несколько этапов.

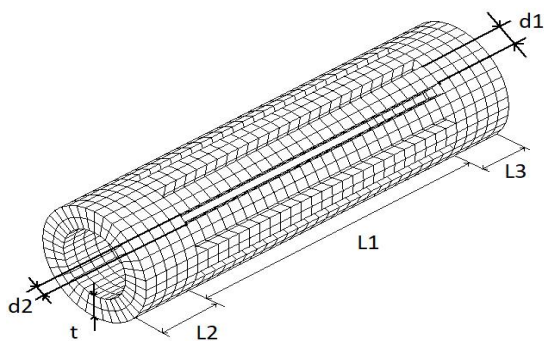


Рис. 4. Модель статичной части фрикционного разъема.

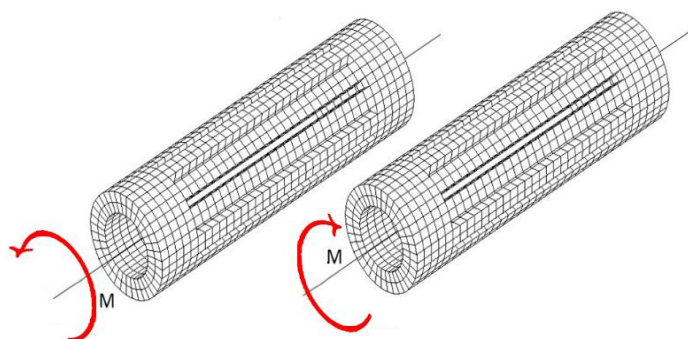


Рис. 5. Схема приложения крутящего момента к статичной части фрикционного разъема

Первый этап расчета характеризуется тем, что неподвижный элемент электрического фрикционного разъема жестко закрепляется по торцу А. Торцы В по шагам нагружаются статической нагрузкой, эквивалентной осевому моменту кручения M_z . При этом M_z монотонно по шагам увеличивался до некоторой величины M_z^* , а потом снова снижался до нуля. При превышении некоторой величины крутящего момента $M_z = M_z^{*p}$ в неподвижном элементе разъема наблюдается процесс развития пластических деформаций.

Второй этап нагружения характеризуется моделированием в непосредственной близости от неподвижной части разъема штыря, расположенного соосно. На торце С штырю задаются условия кинематического нагружения на его смещение вдоль оси Z (рисунок 5).

На третьем этапе исследуется зависимость максимальной величины усилия извлечения штыря разъема из его неподвижной части в зависимости от времени нахождения разъема

в «замкнутом состоянии» (штырь разъема введен в неподвижную часть разъема и находится в нем под действием стенок в обжатом состоянии).

Для иллюстрации результатов расчета на рисунках 6-7 приведены зоны интенсивности пластических деформаций по Мизесу, а на рисунках 8-9 – зависимости осевого усилия извлечения штыря разъема из его неподвижной части от времени для различных углов закручивания и толщин стенки неподвижной части электрического фрикционного разъема.

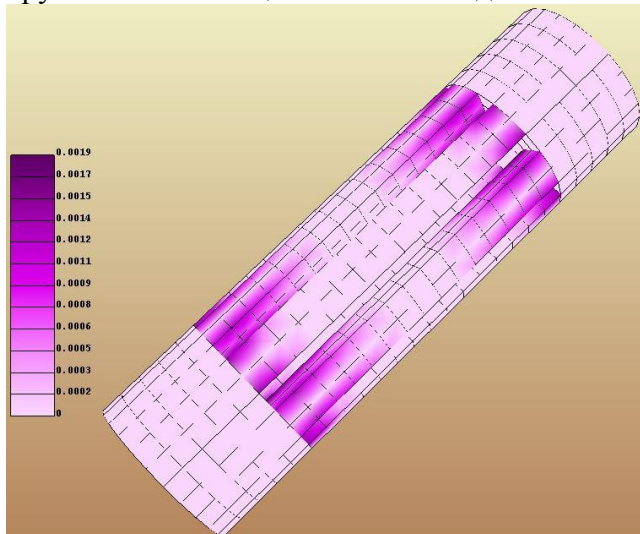


Рис. 6. Интенсивность пластических деформаций по Мизесу для угла закручивания неподвижной части разъема при его формировании $\theta = 2.2^\circ$, количества прорезей $N = 8$, толщины разъема $h = 0.002\text{ м}$

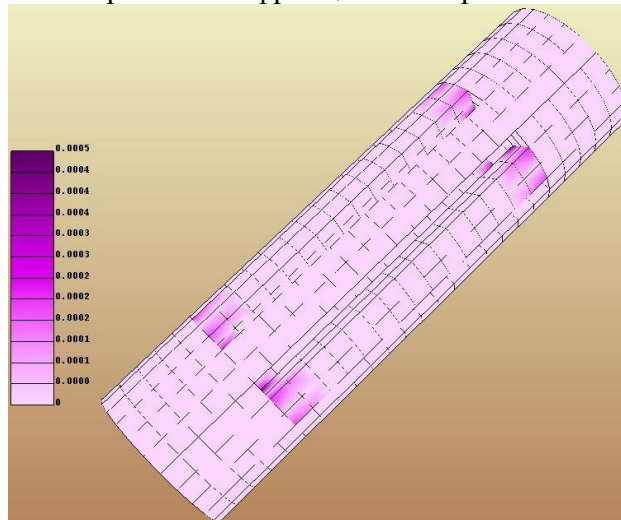


Рис. 7. Интенсивность пластических деформаций по Мизесу для угла закручивания неподвижной части разъема при его формировании $\theta = 1.5^\circ$, количества прорезей $N = 8$, толщины разъема $h = 0.001775\text{ м}$

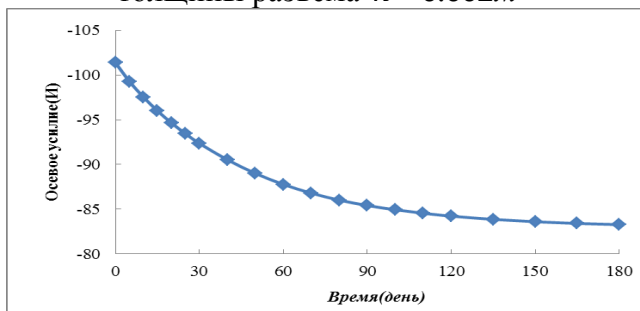


Рис. 8. Зависимость осевого усилия извлечения штыря разъема из его неподвижной части от времени для угла закручивания неподвижной части разъема при его формировании $\theta = 2^\circ$, количества прорезей $N = 8$, толщины разъема $h = 0.002\text{ м}$

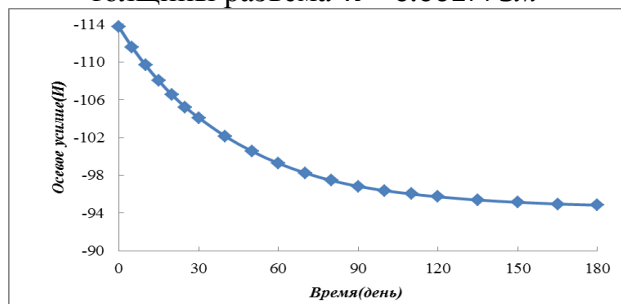


Рис. 9. Зависимость осевого усилия извлечения штыря разъема из его неподвижной части от времени для угла закручивания неподвижной части разъема при его формировании $\theta = 2.2^\circ$, количества прорезей $N = 8$, толщины разъема $h = 0.002\text{ м}$

Первый этап решения задачи характеризует формирование «рабочего состояния» неподвижной части разъема. В этом случае при закручивании сужается внутренний просвет неподвижной части разъема. Возникающие при закручивании пластические деформации не позволяют разъему вернуться в первоначальное состояние и оставляют его внутренний просвет суженным.

Анализ результатов, полученных на втором этапе нагружения, показывает, что величина угла закручивания неподвижной части разъема увеличивает усилие извлечения штыря, а увеличение толщины стенки разъема уменьшает усилие извлечения штыря. Эти зависимости практически линейные.

Анализ результатов, полученных на третьем этапе нагружения, показывает, что величина угла закручивания неподвижной части разъема уменьшает падение усилия извлечения штыря в результате процесса релаксации напряжений, а увеличение толщины стенки разъема

увеличивает падение усилия извлечения штыря в результате процесса релаксации напряжений. Эти зависимости практически линейные, однако в абсолютных величинах влияние угла закручивания невелико (2-3% для рабочего диапазона угла закручивания), а влияние толщины стенки значительно (до 25% для рабочего диапазона угла закручивания).

Исследование напряженно-деформированного состояния в супермаховиках

В современных реалиях все большее значение приобретает проблема аккумулирования энергии. Достаточно простой является технология накопления энергии при помощи кинетических накопителей. Основным ограничением при реализации подобной технологии является скорость вращения роторной части кинетического накопителя, что может привести к повышению уровня напряжений и его возможному дальнейшему разрушению. В литературе приводятся некоторые оценки удельной кинетической энергии вращения маховиков канонической формы. Для маховиков произвольной формы в литературе предлагаются численные методы исследования удельной кинетической энергии. В ряде работ предлагаются кинетические накопители энергии, выполненные из резиноподобных материалов, для расчета которых предлагаются специализированные методики. Расчет супермаховиков, выполненных путем намотки нитей или лент, предполагает использование методики их контактного взаимодействия. В данной работе получены некоторые точные решения в напряжениях для супермаховиков, изготовленных путем намотки и последующей склейки лент.

Ленточный супермаховик с допустимой степенью точности можно представить в виде системы n концентрических цилиндров (рисунок 10), одетых друг на друга с некоторым натягом δ_n . В этом случае еще до начала нагружения в супермаховике возникнет некоторое напряженно-деформированное состояние, которое для двух цилиндров можно определить путем расчета так называемых составных цилиндров.

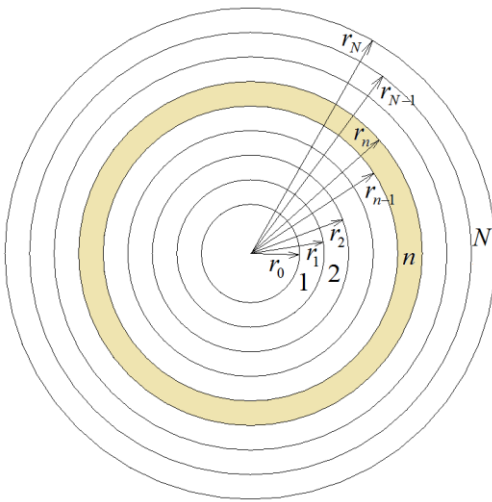


Рис. 10. Схема намотки супермаховика

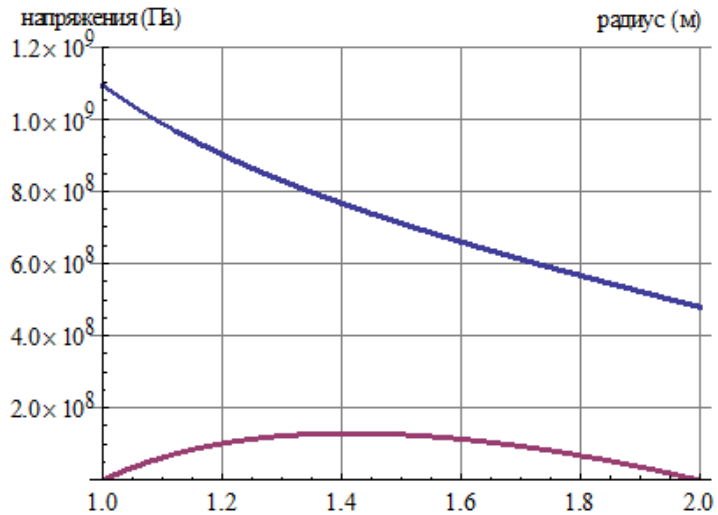


Рис. 11. Эпюры окружных и радиальных напряжений по толщине стенки маховика

Если конструкция состоит из n цилиндров, надетых друг на друга с натягом δ_n , то для n -го цилиндра радиальные σ_{rr}^n и окружные $\sigma_{\varphi\varphi}^n$ напряжения будут определяться по формулам

$$\sigma_{rr}^n = \frac{\delta_{n-1} E}{2} \frac{(r_{n-1}^2 - r_0^2) r_{n-1}}{(r_{n-1}^2 + r_0^2)(r_n^2 - r_{n-1}^2) + (r_{n-1}^2 - r_0^2)(r_n^2 + r_{n-1}^2)} \frac{r^2 - r_n^2}{r^2} - \sum_{i=n}^{N-1} \frac{\delta_i E}{2} \frac{(r_{i+1}^2 - r_i^2) r_i}{(r_i^2 + r_0^2)(r_{i+1}^2 - r_i^2) + (r_i^2 - r_0^2)(r_{i+1}^2 + r_i^2)} \frac{r^2 - r_0^2}{r^2},$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^n = \frac{\delta_{n-1}E}{2} \frac{(r_{n-1}^2 - r_0^2)r_{n-1}}{(r_{n-1}^2 + r_0^2)(r_n^2 - r_{n-1}^2) + (r_{n-1}^2 - r_0^2)(r_n^2 + r_{n-1}^2)} \frac{r^2 + r_n^2}{r^2} -$$

$$- \sum_{i=n}^{N-1} \frac{\delta_i E}{2} \frac{(r_{i+1}^2 - r_i^2)r_i}{(r_i^2 + r_0^2)(r_{i+1}^2 - r_i^2) + (r_i^2 - r_0^2)(r_{i+1}^2 + r_i^2)} \frac{r^2 + r_0^2}{r^2},$$

где E - модуль Юнга материала всех цилиндров, r - текущий радиус.

В случае, если натяг везде одинаковый, формулы для радиальных и окружных напряжений для n -го цилиндра примут вид

$$\sigma_{rr}^n = \frac{\delta E}{2} \left(\frac{(r_{n-1}^2 - r_0^2)r_{n-1}}{(r_{n-1}^2 + r_0^2)(r_n^2 - r_{n-1}^2) + (r_{n-1}^2 - r_0^2)(r_n^2 + r_{n-1}^2)} \frac{r^2 - r_n^2}{r^2} - \right.$$

$$\left. - \sum_{i=n}^{N-1} \frac{(r_{i+1}^2 - r_i^2)r_i}{(r_i^2 + r_0^2)(r_{i+1}^2 - r_i^2) + (r_i^2 - r_0^2)(r_{i+1}^2 + r_i^2)} \frac{r^2 - r_0^2}{r^2} \right),$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^n = \frac{\delta E}{2} \left(\frac{(r_{n-1}^2 - r_0^2)r_{n-1}}{(r_{n-1}^2 + r_0^2)(r_n^2 - r_{n-1}^2) + (r_{n-1}^2 - r_0^2)(r_n^2 + r_{n-1}^2)} \frac{r^2 + r_n^2}{r^2} - \right.$$

$$\left. - \sum_{i=n}^{N-1} \frac{(r_{i+1}^2 - r_i^2)r_i}{(r_i^2 + r_0^2)(r_{i+1}^2 - r_i^2) + (r_i^2 - r_0^2)(r_{i+1}^2 + r_i^2)} \frac{r^2 + r_0^2}{r^2} \right).$$

Если принять, что контактные давления между всеми цилиндрами одинаковы и равны p_c , то соотношения для напряжений принимают вид

$$\sigma_{rr}^n = p_c \left[\frac{r^2 - r_n^2}{r^2} \frac{r_{n-1}^2}{(r_n^2 - r_{n-1}^2)} - \frac{r^2 - r_0^2}{r^2} \sum_{i=n}^{N-1} \frac{r_i^2}{(r_i^2 - r_0^2)} \right],$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^n = p_c \left[\frac{r^2 + r_n^2}{r^2} \frac{r_{n-1}^2}{(r_n^2 - r_{n-1}^2)} - \frac{r^2 + r_0^2}{r^2} \sum_{i=n}^{N-1} \frac{r_i^2}{(r_i^2 - r_0^2)} \right].$$

Если принять соотношение

$$\delta_i = \frac{2p}{Er_i} \frac{(r_i^2 + r_0^2)(r_{i+1}^2 - r_i^2) + (r_i^2 - r_0^2)(r_{i+1}^2 + r_i^2)}{(r_{i+1}^2 - r_i^2)},$$

то соотношения для напряжений принимают вид

$$\sigma_{rr}^n = p \left[\frac{(r_{n-1}^2 - r_0^2)}{(r_n^2 - r_{n-1}^2)} \frac{r^2 - r_n^2}{r^2} - \frac{(r^2 - r_0^2)(N-n)}{r^2} \right], \sigma_{\varphi\varphi}^n = p \left[\frac{(r_{n-1}^2 - r_0^2)}{(r_n^2 - r_{n-1}^2)} \frac{r^2 + r_n^2}{r^2} - \frac{(r^2 + r_0^2)(N-n)}{r^2} \right].$$

Рассмотрим задачу об определении напряжений во вращающемся с постоянной угловой скоростью ω однородном диске плотностью ρ , модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона μ . Для цилиндра с внешним радиусом r_N и центральным отверстием радиуса r_0 выражения для напряжений примут вид

$$\sigma_{rr}(r) = \frac{3+\mu}{8} \rho \omega^2 r_N^2 \left(1 + k^2 (1 - r_N^2 r^{-2}) - r^2 r_N^{-2} \right),$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}(r) = \frac{3+\mu}{8} \rho \omega^2 r_N^2 \left(1 + k^2 (1 + r_N^2 r^{-2}) - \frac{1+3\mu}{3+\mu} r^2 r_N^{-2} \right),$$

где $k = r_0/r_N$.

Были проведены три серии расчетов для супермаховика со следующими геометрическими и механическими характеристиками: модуль Юнга $E = 200000 \text{ МПа}$, коэффициент

Пуассона $\mu = 0.3$, внутренний радиус $r_0 = 1\text{ м}$, наружный радиус $r_1 = 2\text{ м}$ ($k = 2$), временное сопротивление $\sigma_{\text{вр}} = 1100\text{ МПа}$, плотность материала $\rho = 7860\text{ кг/м}^3$. Сплошной маховик для данных параметров допускает угловую скорость вращения $\omega = 200\text{ рад/с}$, при этом максимальные напряжения в маховике (окружные напряжения на внутренней поверхности маховика) равны $\sigma_{\varphi\varphi}^{\text{max}} = 1092.54\text{ МПа}$. На рисунке 11 приведены эпюры окружных и радиальных напряжений по толщине стенки маховика.

Использование супермаховика (в форме составных цилиндров) позволяет повысить угловую скорость вращения. Далее приведены эпюры окружных напряжений в сплошном маховике и супермаховике (до и после его раскрутки) для соответствующей каждому варианту угловой скорости вращения для 10 и 100 слоев соответственно для случая одинакового натяга (рисунок 12), случая равных контактных давлений (рисунок 13) и случая монотонно изменяющегося натяга (рисунок 14). Нижняя прерывистая линия соответствует нераскрученному слоистому маховику, верхняя – раскрученному. Непрерывной линией отмечены напряжения в сплошном маховике при раскрутке, предельной для слоистого маховика. В таблице 1 приведены соответствующие каждому расчетному случаю число слоев, угловая скорость вращения, увеличение удельной энергоемкости маховика, а также параметры моделирования натяга (величина натяга δ , величина контактного давления p_c или величина параметра монотонного натяга p).

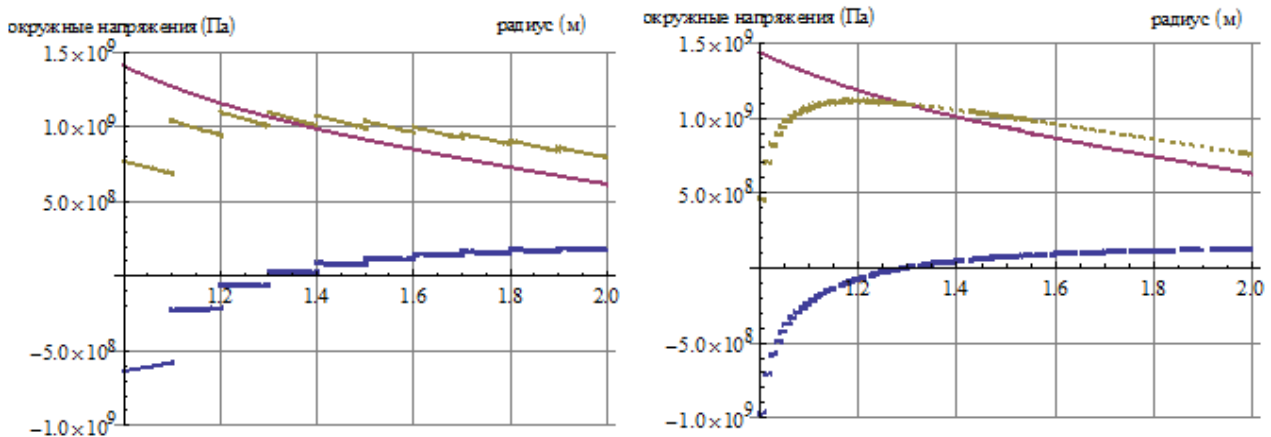


Рис. 12. Эпюры окружных напряжений в сплошном маховике и супермаховике (до и после его раскрутки) для соответствующей каждому варианту угловой скорости вращения для 10 и для 100 слоев для случая одинакового натяга

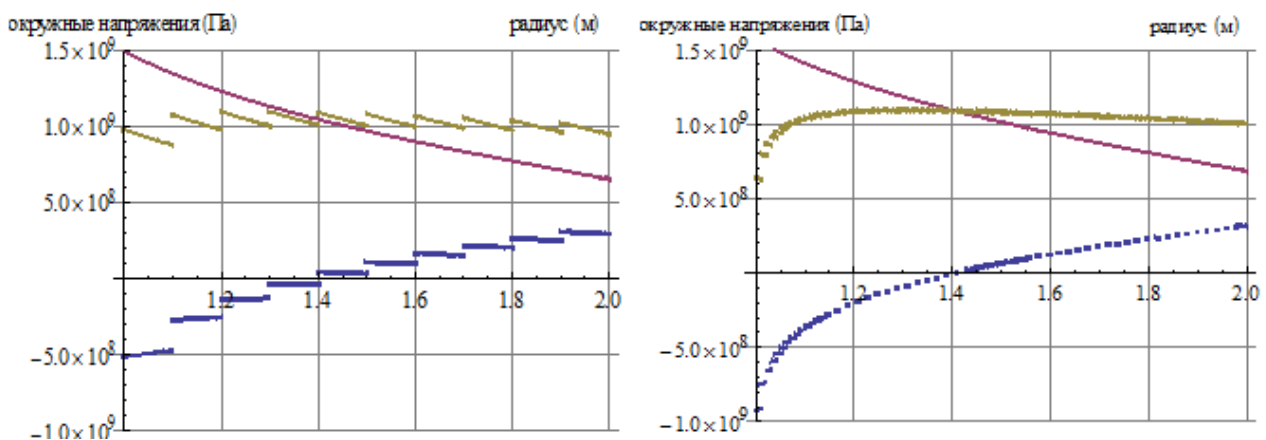


Рис. 13. Эпюры окружных напряжений в сплошном маховике и супермаховике (до и после его раскрутки) для соответствующей каждому варианту угловой скорости вращения для 10 и для 100 слоев для случая равных контактных давлений

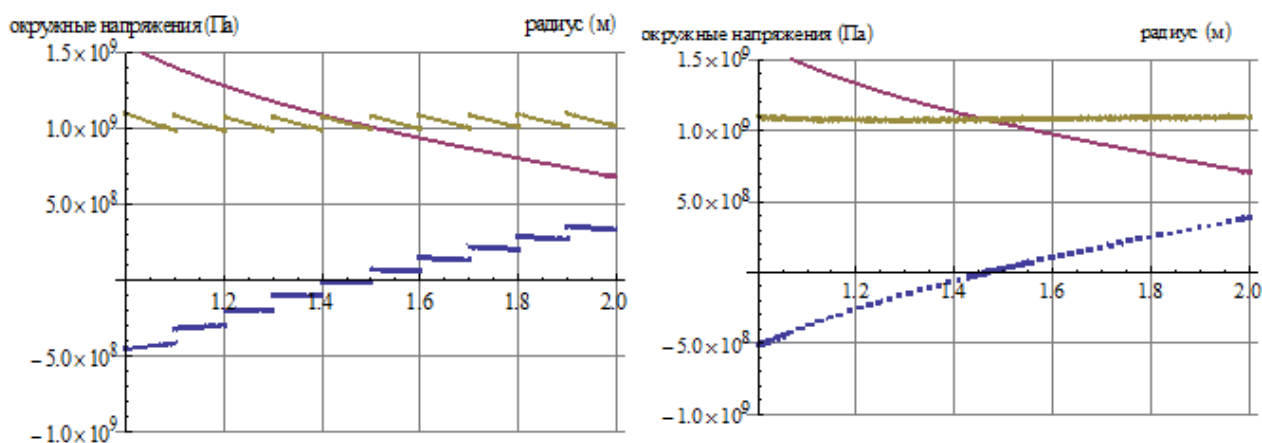


Рис. 14. Эпюры окружных напряжений в сплошном маховике и супермаховике (до и после его раскрутки) для соответствующей каждому варианту угловой скорости вращения для 10 и для 100 слоев для случая монотонно изменяющегося натяга

Таблица 1. Допустимая угловая скорость супермаховика

Параметр натяга	Число слоев	Угловая скорость
$\delta = 1,28$ мм	10	227,0
$\delta = 0,128$ мм	100	229,2
$p_c = 16$ Мпа	10	234,0
$p_c = 1,6$ Мпа	100	239,0
$p = 25,2$ МПа	10	238,5
$p = 2,52$ МПа	100	242,9

Получены точные решения распределения напряжений в супермаховике для различного моделирования насадок. Исследовано влияние различного моделирования насадок на увеличение скорости вращения супермаховика. Получена зависимость окружных напряжений в кольцах супермаховика (напряжения натяга) при его намотке. Приведена зависимость коэффициента эффективности супермаховика для большого количества слоев от коэффициента Пуассона материала маховика и отношения внешнего радиуса супермаховика к внутреннему.

Можно отметить, что оптимальной для повышения энергоемкости супермаховика будет предложенная в работе монотонная намотка. В этом случае допустимая угловая скорость вращения по сравнению со сплошным маховиком может быть повышена более чем на 20%, причем увеличение количества слоев намотки повышает энергоемкость конструкции (до 2%). Учет остаточных напряжений также повышает энергоемкость супермаховика, но незначительно, не более чем на 1%.

Однако, одним из существенных недостатков супермаховиков является их расслаивание в процессе раскрутки. Поэтому при намотке слои маховика должны спаиваться или склеиваться, что приводит к определенным требованиям к механическим характеристикам склеивающего (или спаивающего) слоя.

Исследование процессов деформирования фиттинг-соединения

Фиттинг-соединение представляет стянутое заклепками соединение двух ступенчатых пластин из титана и углепластика, общий вид которого схематично приведен на рисунке 15а. На рисунках 15б и 15в приведены схемы расположения заклепок по фиттингу в различных проекциях. Фиттинг-соединение растягивается нагрузкой $q_r = 19500$ кГ; коэффициент трения между титаном и углепластиком был принят равным $\text{ftr} = 0.1$. Материал заклепок – сталь. Проводился расчет как для случая упругопластической стали, так и для упрочненной.

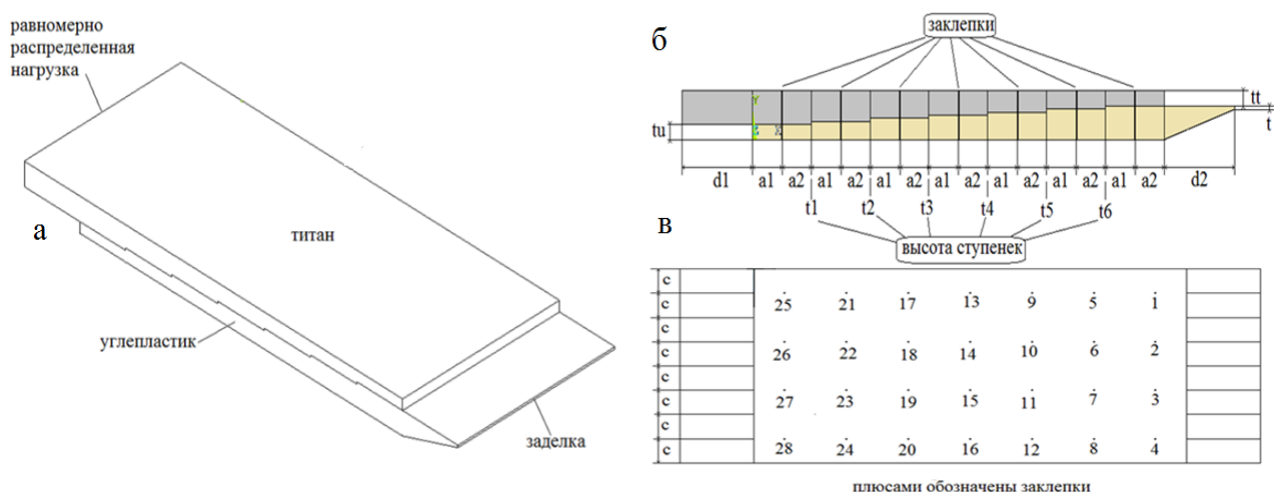


Рис. 15. Схематичное изображение фиттинг-соединения – а; вид сбоку – б; вид сверху – в

Расчет проводился на основе предложенной методики, а также в ППП ANSYS. На рисунках 16 приведены распределения интенсивности напряжений по Мизесу в фиттинг-соединении и заклепках для случаев различных диаметров заклепок. Для иллюстрации результатов расчета на рисунках 17-18 приведены зависимости максимальной интенсивности напряжений по Мизесу в заклепках в зависимости от их радиуса.

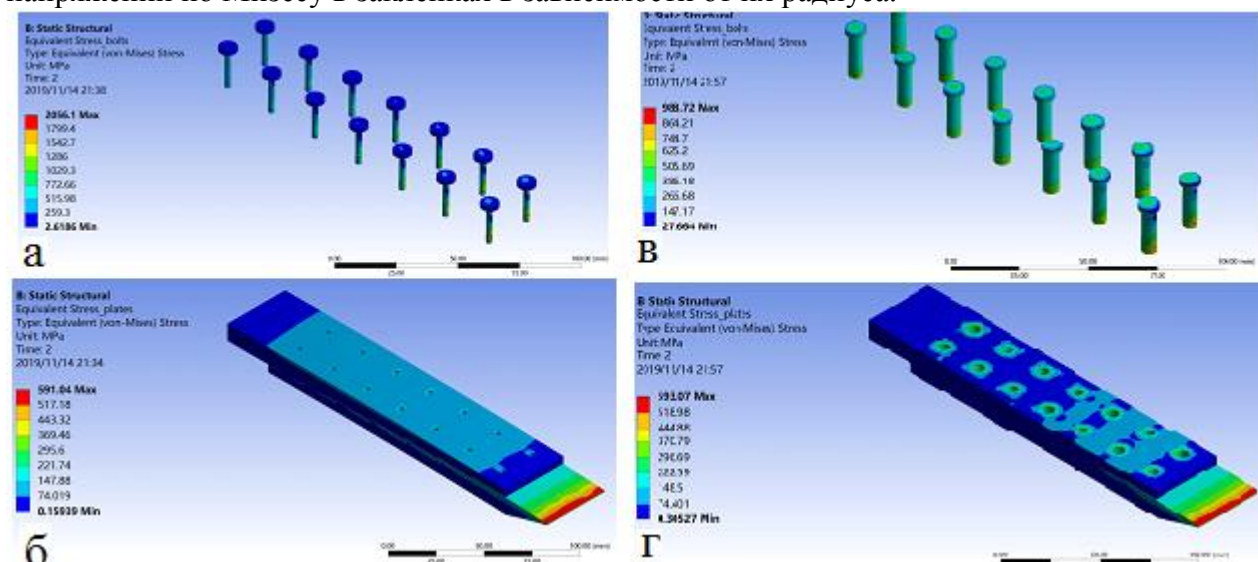


Рис. 16. Интенсивность напряжений в заклепках (а, в) и фиттинг-соединении (б, г) для диаметра заклепок d=3 мм и d=6 мм соответственно

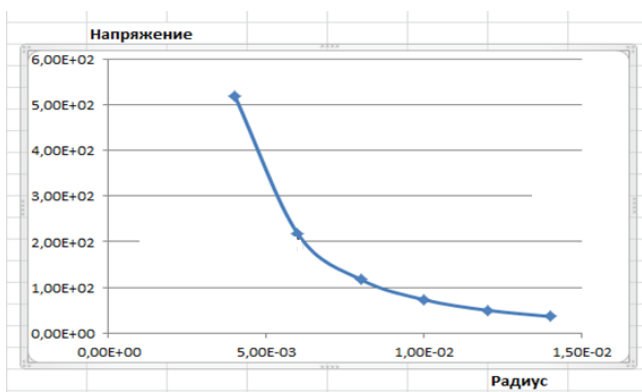


Рис. 17. Зависимость максимальной интенсивности напряжений в заклепках от их радиуса для первого ряда заклепок

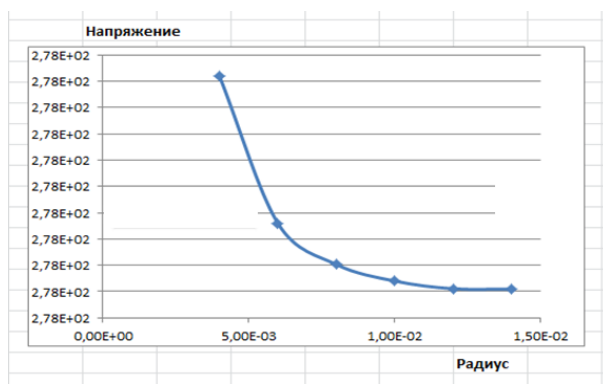


Рис. 18. Зависимость максимальной интенсивности напряжений в заклепках от их радиуса для последнего ряда заклепок

Можно отметить, что увеличение радиуса заклепки приводит к заметному уменьшению в них напряжений. Расчет с учетом контактного взаимодействия между титановой и углепластиковой пластинами также снижает уровень напряжений в заклепках.

Максимальные напряжения в углепластике для случаев расчета с разными диаметрами заклепок практически не изменяются на некотором отдалении от отверстий. Напряжения в зоне заклепок увеличиваются по мере увеличения диаметра заклепки. Если диаметр заклепки меньше 5 мм, то в неупрочненных заклепках развиваются пластические деформации. Учет упругопластического деформирования заклепок практически не влияет на характер напряженного состояния в титане и углепластике.

В третьей главе рассматриваются модели упруговязкопластического деформирования грунтов и скальных пород. Методика решения нестационарной задачи термоупругого взаимодействия элементов конструкций распространена на решение задач контактного взаимодействия элементов конструкций транспортных сооружений и грунтовых сред, рассматривается модель дискретно-подкрепленных конечных элементов.

Решен ряд модельных и практических задач упруговязкопластического деформирования взаимодействующей с грунтами обделки тоннеля, расположенной в грунтах сложной физической природы, при термосиловом нагружении.

Приводится некоторый обзор используемых моделей грунтов, определяются параметры прочности, соотношения типа Прандтля-Рейса, связывающие приращения компонент истинных напряжений и истинных деформаций, обобщаются на случай «слабых» грунтов

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G \left(\Delta\varepsilon_{ij}^{tr} + \delta_{ij} \frac{3\mu}{1-2\mu} \Delta\varepsilon_0^{tr} \right) - \alpha \frac{\left(\frac{G}{\tau_i} \sigma'_{ij} + Ktg\varphi_{oct}^* \delta_{ij} \right) \sum_{kl} \left(\frac{G}{\tau_i} \sigma'_{kl} + Ktg\varphi_{oct}^* \delta_{kl} \right) \Delta\varepsilon_{kl}^{tr}}{G + Ktg^2\varphi_{oct}^*},$$

а также записываются для бетона и скальных пород

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G \left(\Delta\varepsilon_{ij}^{tr} + \delta_{ij} \frac{3\mu}{1-2\mu} \Delta\varepsilon_0^{tr} \right) - \alpha \frac{\left(\frac{G}{\tau_i} \sigma'_{ij} + K(R_c - R_p) \delta_{ij} \right) \sum_{kl} \left(\frac{G}{\tau_i} \sigma'_{kl} + K(R_c - R_p) \delta_{kl} \right) \Delta\varepsilon_{kl}^{tr}}{G + K(R_c - R_p) \delta_{ij}}.$$

При решении термоупругой задачи в дополнении к уравнению равновесия используется вариационное уравнение теплопроводности в форме

$$\begin{aligned} & \iiint_V \frac{1}{T_0} \lambda_{ij} \theta_{,i} \delta \theta_{,j} dV + \iint_{S_h} \frac{1}{T_0} h \theta \delta \theta dS + \iiint_V \frac{1}{T_0} \rho c_\varepsilon \dot{\theta} \delta \theta dV + \\ & + \iint_{S_q} \frac{1}{T_0} q^* \delta \theta dS - \iint_{S_h} \frac{1}{T_0} h \theta_{cp} \delta \theta dS - \iiint_V \frac{1}{T_0} r \delta \theta dV = 0, \end{aligned}$$

где θ – температурное отклонение от абсолютной температуры T_0 естественного состояния тела; θ_{cp} – температурное отклонение от абсолютной температуры T_0 естественного состояния тела окружающей материальное тело среды; ρ – массовая плотность материала; h – коэффициент конвекции; r – удельная мощность внутренних источников тепла; c_ε – удельная теплоемкость при постоянной деформации; λ_{ij} – компоненты тензора теплопроводности.

В некоторых задачах, возникающих при расчете строительных или транспортных сооружений, приходится иметь дело с локально подкрепленными конструкциями, в частности, с железобетоном, в котором арматура может быть размещена неравномерно и специальным образом. Использовать метод осреднения свойств может быть нерацionalmente и затруднительно, так как в пределах каждого элемента может оказаться один или два подкрепляющих стержня, причем расположенных произвольным образом. В этом случае целесообразно использовать специальные конечные элементы сплошной среды, в которых дискретно расположены подкрепления в виде стержней, работающих на растяжение-сжатие и жестко связанные с деформируемой средой основного массива.

В качестве базовых конечных элементов выбираются трехмерные изопараметрические конечные элементы с линейной степенью аппроксимации. Подкрепления предполагаются прямолинейными и проходящими через конечный элемент произвольным образом. Базовой информацией о каждом из них являются значения локальных координат, определяющие начальную и конечную точки, и значения жесткости. В итоге суммарную матрицу жесткости можно определить в виде суммы матрицы жесткости элемента сплошной среды (бетон) и матриц жесткости проходящих через конечный элемент стержней (арматуры), элементы которых разнесены по степеням свободы КЭ бетона. С энергетической точки зрения это означает, что потенциальная энергия деформации подкрепленного конечного элемента складывается из потенциальной энергии деформации базового объема и потенциальной энергии деформации всех подкреплений.

Расчет напряженно-деформированного состояния в обделке тоннеля при термическом нагружении

Для оценки изменения напряженного состояния в неразрезной (рисунок 19) и разрезной (рисунок 20), представленной совокупностью взаимодействующих между собой блоков, обделке тоннеля при термическом нагружении была решена задача деформирования кольца обделки под действием термического нагружения.

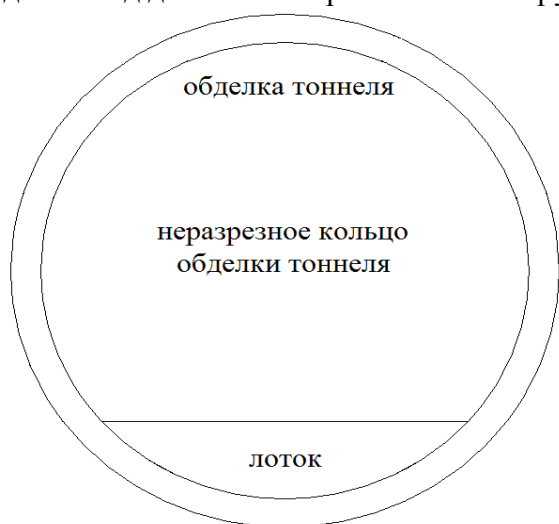


Рис. 19. Схематичное изображение расчетной области неразрезного кольца обделки тоннеля



Рис. 20. Схематичное изображение расчетной области разрезного кольца обделки тоннеля

Для иллюстрации результатов расчета на рисунках 21-22 представлены распределения первых главных напряжений в бетонном кольце обделки без лотка для неразрезного и разрезного колец соответственно, на рисунках 23-24 – для расчета с лотком.

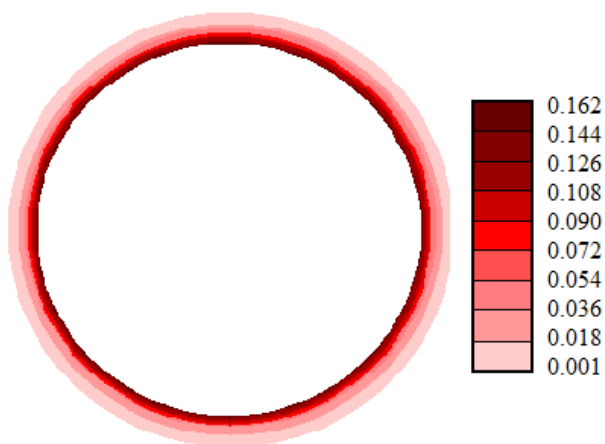


Рис. 21. Первые главные напряжения для расчета кольца обделки тоннеля без лотка

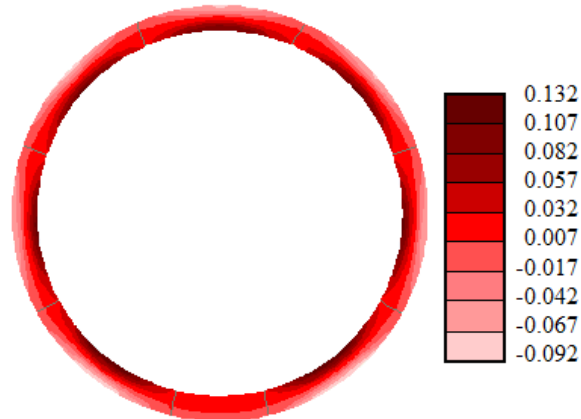


Рис. 22. Первые главные напряжения для расчета кольца обделки тоннеля без лотка

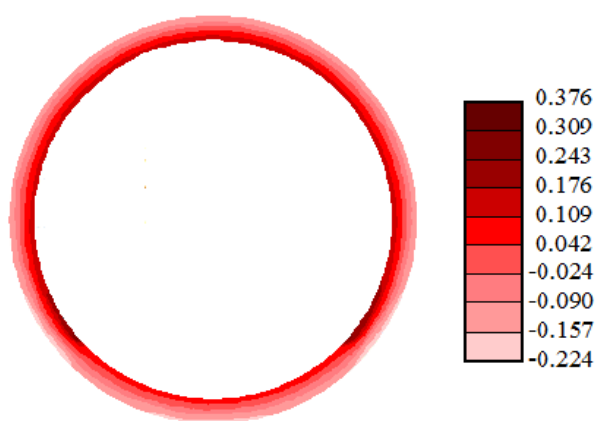


Рис. 23. Первые главные напряжения для расчета кольца обделки тоннеля с лотком

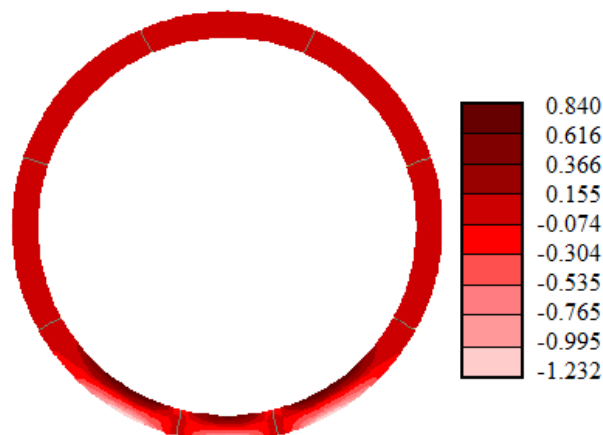


Рис. 24. Первые главные напряжения для расчета кольца обделки тоннеля с лотком

Для оценки изменения напряженного состояния в неразрезной (рисунки 25-26) и разрезной обделке тоннеля от эксцентриситета расположения ж/д пути относительно продольной плоскости симметрии тоннеля была решена задача деформирования кольца обделки под действием силовой нагрузки от веса ж/д состава.

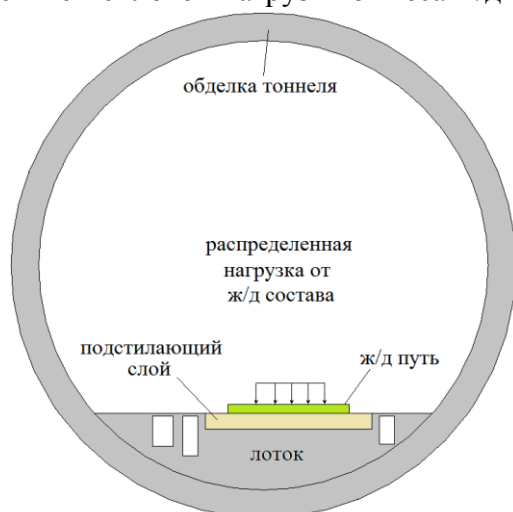


Рис. 25. Схематичное изображение расчетной области неразрезного кольца обделки тоннеля для несимметричного действия нагрузки от ж/д состава

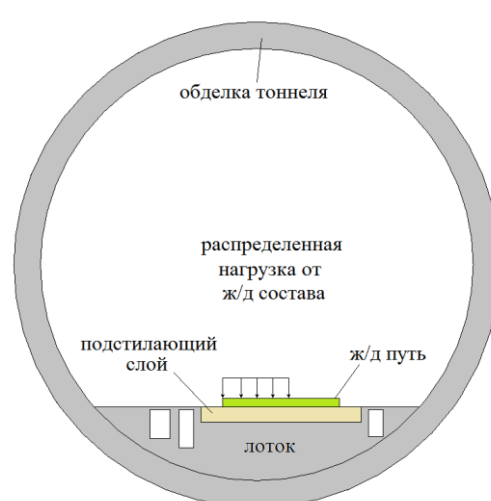


Рис. 26. Схематичное изображение расчетной области неразрезного кольца обделки тоннеля для симметричного действия нагрузки от ж/д состава.

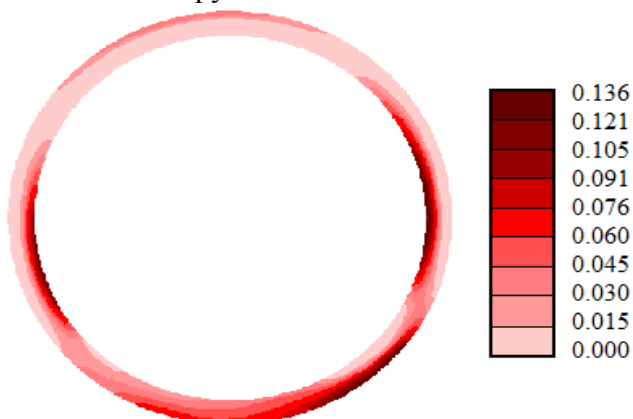


Рис. 27. Первые главные напряжения для первого случая расчета (нагрузка с эксцентриситетом) в кольце обделки тоннеля

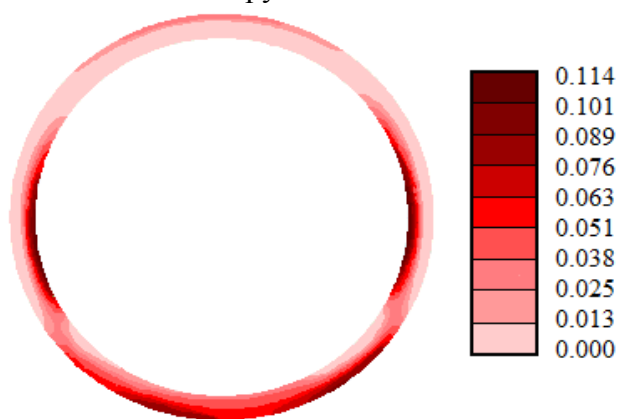


Рис. 28. Первые главные напряжения для первого случая расчета (нагрузка без эксцентриситета) в кольце обделки тоннеля

Для иллюстрации результатов расчета на рисунках 27-28 представлены распределения первых главных напряжений в бетонном кольце обделки тоннеля для неразрезного кольца для расчетов с учетом эксцентриситета расположения ж/д пути и без эксцентриситета соответственно, на рисунках 29-30 представлены напряжения отдельно в лотке для тех же случаев расчета.



Рис. 29. Первые главные напряжения для первого случая расчета (нагрузка с эксцентриситетом) в лотке с подстилающим слоем и ж/д путями



Рис. 30. Первые главные напряжения для первого случая расчета (нагрузка без эксцентриситета) в лотке с подстилающим слоем и ж/д путями

Для оценки изменения напряженного состояния внутри неразрезного и разрезного колец бетонной обделки тоннеля от веса всей расчетной области была решена следующая задача. Рассматривается плоская область, включающая в себя поперечное сечение тоннеля и находящийся в нижней части тоннеля лоток, подстилающий слой и ж/д полотно, тампонажный слой, зону химического закрепления грунта и сам грунт (рисунки 31-32). Зона химического закрепления грунта является кольцом, окружающим обделку тоннеля с тампонажным слоем, толщиной $T_{хим}$ и с модулем Юнга $E_{хим}$. Модуль Юнга грунта $E_{грунт}$, расстояние между верхней лицевой поверхностью грунта и верхним срезом обделки тоннеля – $H_{грунт}$.

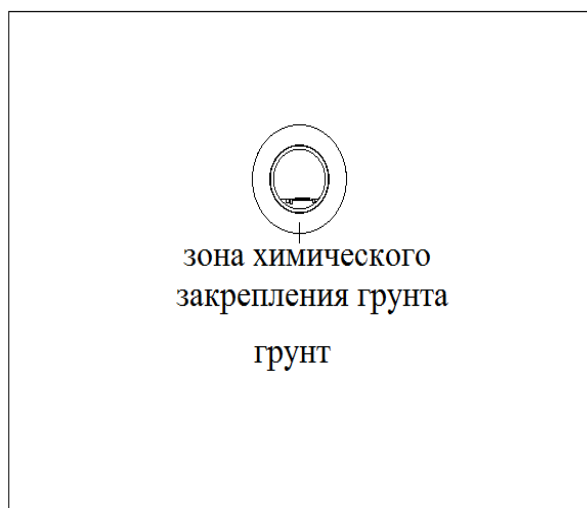


Рис. 31. Схематичное изображение расчетной области

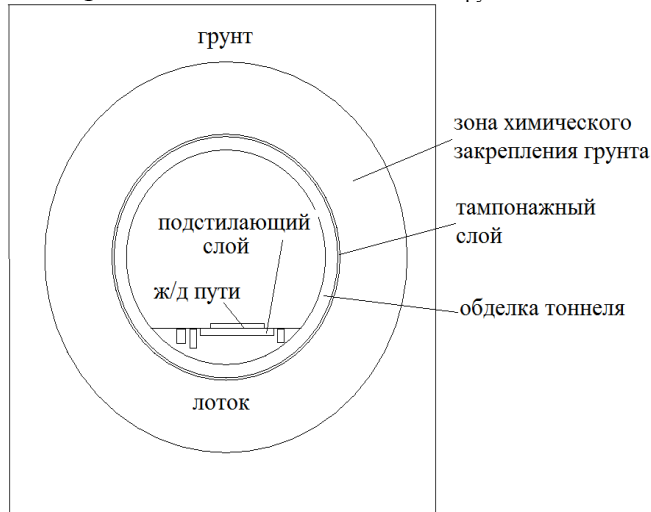


Рис. 32. Схематичное изображение расчетной области неразрезного кольца обделки тоннеля для симметричного действия нагрузки от ж/д состава

В таблицах 2 и 3 приведены заглубления (максимально возможные) тоннеля по верхнему срезу ($H_{грунт}$ в метрах) в зависимости от толщины кольца химического закрепления ($T_{хим}$ в метрах) для различных модулей Юнга окружающего тоннель грунта $E_{грунт}$ и для различных модулей Юнга химически закрепленного грунта $E_{хим}$, при которых в неразрезной обделке тоннеля максимальные растягивающие напряжения равны 2 Мпа для неразрезного и разрезного кольца тоннеля соответственно.

Таблица 2. Заглубление тоннеля по верхнему срезу для неразрезного кольца тоннеля.

Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 3 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	<0,0	3,0	9,0	16,2	24,8	33,9	43,8	54,1
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	<0,0	4,5	13,7	24,5	37,4	51,1	65,9	80,9
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	<0,0	7,0	20,9	37,1	56,4	76,9	99,2	121,0
Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 30 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	<0,0	4,1	10,0	17,3	26,3	36,2	46,3	57,2
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	<0,0	6,2	15,1	26,1	39,6	54,4	69,6	85,9
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	<0,0	8,5	21,4	37,8	57,7	77,5	100,3	121,9
Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 100 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	2,2	5,9	12,1	20,2	30,1	40,4	51,5	63,5
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	3,1	7,9	15,9	26,5	40,3	55,7	72,2	89,8
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	4,4	10,6	23,1	39,8	61,5	79,9	102,7	123,0
Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 300 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	8,7	12,5	20,1	30,4	42,2	56,8	67,8	75,4
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	11,1	15,8	25,3	38,2	53,0	71,2	85,0	94,5
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	13,9	19,9	31,8	47,9	66,3	89,1	106,3	126,2

Таблица 3. Заглубление тоннеля по верхнему срезу для разрезного кольца тоннеля

Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 3 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	3,2	8,3	18,7	32,3	48,1	66,7	88,6	113,0
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	5,0	12,5	27,8	47,8	71,0	98,3	130,5	166,4
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	7,0	17,1	37,7	64,7	96,1	133,0	176,4	224,9
Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 30 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	4,3	9,6	20,3	34,5	51,3	69,9	93,5	118,1
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	6,6	14,4	30,1	51,0	75,7	103,1	137,7	173,9
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	9,1	19,7	40,9	69,1	102,4	139,3	186,2	235,0
Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 100 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	7,3	13,1	24,9	40,4	59,2	81,3	106,1	130,1
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	10,3	18,4	35,0	56,7	83,0	113,9	148,6	182,2
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	14,0	25,0	47,3	76,6	112,1	153,9	200,8	246,1
Модуль Юнга окружающего тоннель грунта $E_{\text{грунт}} = 300 \text{ МПа}$								
$T_{\text{хим}} [\text{м}]$	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$E_{\text{хим}} = 2500 \text{ МПа}$	18,7	26,2	41,2	61,8	88,0	119,8	137,7	153,2
$E_{\text{хим}} = 5000 \text{ МПа}$	24,5	34,2	53,5	80,1	113,9	154,9	178,0	198,0
$E_{\text{хим}} = 10000 \text{ МПа}$	31,8	44,3	69,3	103,6	147,2	200,1	229,9	255,7

При расчете обделки тоннеля в виде неразрезного кольца без лотка на температурную нагрузку получающиеся результаты являются осесимметричными, максимальные растягивающие напряжения одинаковы по всей внутренней поверхности тоннеля.

Для расчета температурных напряжений в бетонном кольце обделки схему неразрезного кольца применять нельзя – бетон обязательно треснет от растягивающих напряжений!

Для расчета температурных напряжений в бетонном кольце обделки необходимо использовать схему разрезного кольца.

Несимметричное расположение железнодорожных путей увеличивает растягивающие напряжения в обделке тоннеля с 0.114 МПа до 0.136 МПа. Эксцентриситетом расположения ж/д путей можно пренебречь.

Максимальные растягивающие напряжения возникают на внутренней поверхности боковых зон обделки тоннеля, поэтому учет напряжений от прохождения ж/д состава будет разгружать обделку тоннеля при нагружении ее собственным весом.

При расчете по схеме разрезного кольца глубина залегания тоннеля больше, чем по схеме неразрезного кольца. При этом оценка прочности для неразрезного кольца велась по растягивающим напряжениям в верхнем своде обделки, а для разрезного кольца – в зоне стыка лотка и обделки.

Можно отметить такую закономерность, что при увеличении модуля Юнга в грунте или расширении зоны химического закрепления грунта в зоне тоннеля растягивающие напряжения в обделке начинают локализоваться на внутренней поверхности верхней части тоннеля (верхнего свода). Вторая зона локализации – зона стыка обделки тоннеля и лотка. В остальной части обделки тоннеля нет растягивающих напряжений.

При совместном расчете тоннеля на действие собственного веса расчетной области, нагрузки от ж/д состава и разницы температуры на внешней и внутренней поверхности обделки тоннеля можно отметить следующие полученные закономерности.

1. Определяющим является нагружение собственным весом расчетной области.
2. Нагружение расчетной области нагрузкой от проходящего ж/д состава всегда разгружает обделку тоннеля.
3. Расчет по схеме неразрезного кольца без лотка от суммарной нагрузки приводит к локализации максимальных растягивающих напряжений на внутренней поверхности обделки тоннеля в зонах верхнего и нижнего свода (самая верхняя и самая нижняя точки). Конструкция слабо держит нагрузку из-за большого вклада температурных напряжений. (3,36 МПа).
4. Расчет по схеме неразрезного кольца с лотком от суммарной нагрузки приводит к локализации максимальных растягивающих напряжений в зоне стыка обделки тоннеля и лотка. Максимальные напряжения выше, чем в предыдущем случае. Конструкция также слабо держит нагрузку из-за большого вклада температурных напряжений. (4,73 МПа).
5. Расчет по схеме разрезного кольца без лотка от суммарной нагрузки приводит к локализации максимальных растягивающих напряжений на внутренней поверхности обделки тоннеля в зоне верхнего свода. (0,59 МПа).
6. Расчет по схеме разрезного кольца с лотком от суммарной нагрузки приводит к локализации максимальных растягивающих напряжений в зоне стыка обделки тоннеля и лотка. Максимальные напряжения выше, чем в предыдущем случае. (1,94 МПа).

Расчет осадок в зоне тоннеля метрополитена

Была решена модельная задача деформирования упруговязкопластического грунта в зоне проложенных тоннелей метрополитена, определен стабилизовавшийся уровень осадки грунта. Поперечный разрез расчетной области приведен на рисунке 3.25, ее деформирование происходило под собственным весом. В грунте расположены бетонные тоннели, которые моделировались сплошным (неразрезным) бетонным кольцом.

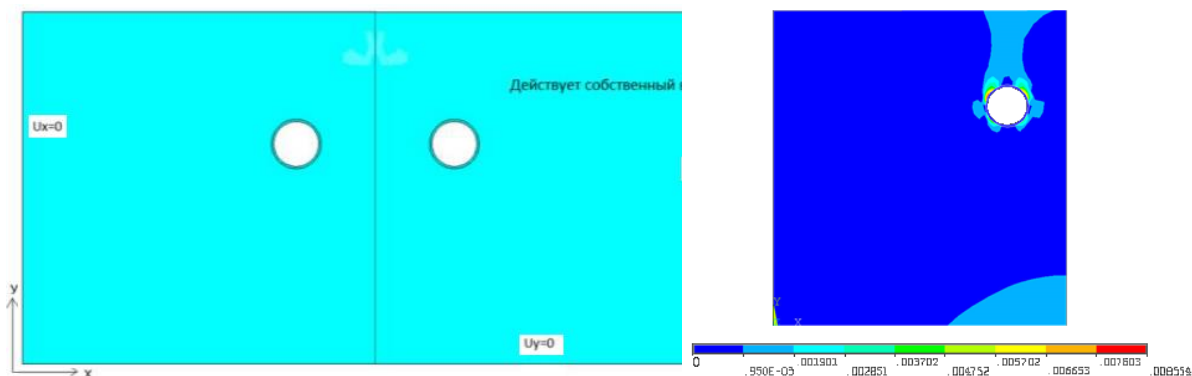


Рис. 33. Схематичное изображение расчетной области

Рис. 34. Распределение зон интенсивности пластических деформаций в суглинке

Было проведено 3 варианта расчета для различных, характерных для реального разреза, однородных грунтов, механические характеристики которых приведены в таблице 4.

Для иллюстрации результатов расчета на рисунке 34 приведено распределение зон интенсивности пластических деформаций в суглинке. На рисунке 35 приведено изменение максимальной осадки грунта в зоне расположения тоннелей метрополитена с течением времени (месяцы) в глине 2 (а) и суглинке (б) соответственно.

Таблица 4. Механические характеристики грунтов

Грунты	Плотность [кг/м ³]	К-нт Пуассона	Модуль Юнга [МПа]	Сцепление [КПа]	Угол вн. трен. [гр]
Суглинок	2040	0.3	18	12	26
Глина 1	2040	0.42	33	42	22
Глина 2	2040	0.42	35	60	19

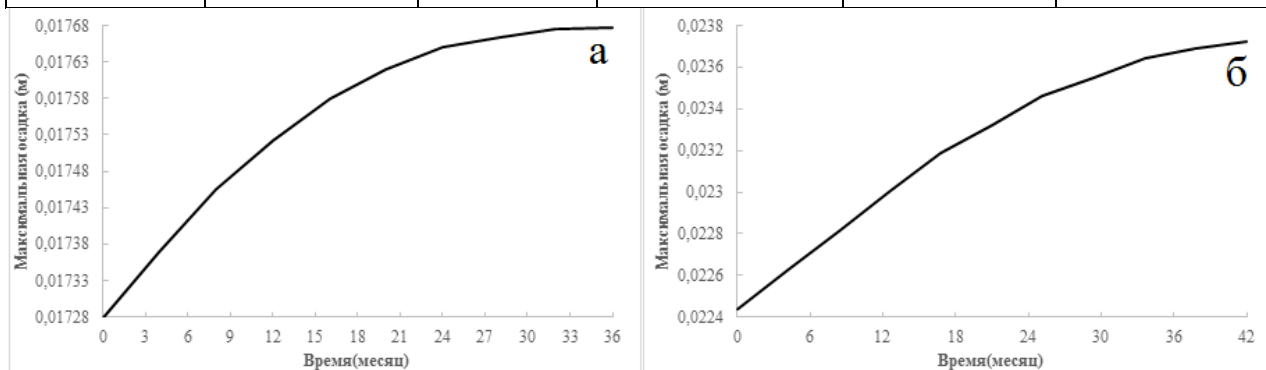


Рис. 35. Изменение максимальной осадки грунта в зоне расположения тоннелей метрополитена с течением времени (месяцы) в глине 2 (а) и суглинке (б) соответственно.

Можно отметить, что максимальная осадка в неразрезной обделке тоннеля, расположенного в глине, меньше чем в обделке, расположенной в суглинке.

Изменение максимальной осадки от времени меньше для более прочных грунтов (для глины - 1.5%, для суглинка - 5.7%).

Заключение

В диссертации на основе определяющих соотношений между приращениями «истинных» деформаций и напряжений была разработана и реализована методика решения геометрически нелинейных упруговязкопластических трехмерных задач деформирования элементов конструкций, объектов транспортного машиностроения и грунтовых массивов.

Развиты многочисленные вычислительные модели трехмерных упруговязкопластических элементов конструкций при их контактном взаимодействии с деформируемыми средами. Вычислительные алгоритмы включают в себя:

- конечные элементы упруговязкопластической среды;
- семейство контактных конечных элементов;

- алгоритмы решения задач упруговязкопластического деформирования взаимодействующих между собой трехмерных элементов конструкций.

Проведен анализ деформирования конструктивных элементов подземных сооружений, возводимых при строительстве метрополитена.

Решены:

- задача оценки энергоемкости супермаховика;
- нелинейная упругопластическая задача деформирования фитинга, представляющего собой соединенные заклепками пластины, с учетом их контактного взаимодействия;
- вязкоупругая и упругопластическая задача создания и эксплуатации фрикционного разъема;
- задача упруговязкопластического деформирования грунта с расположенными в нем тоннелями метрополитена;
- задача деформирования расположенного в грунте железнодорожного тоннеля при термосиловом нагружении.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Суй, И. Вычисление напряжений в кольце обделки тоннеля при термическом нагружении / И. Суй, Д.В. Бережной, А.А. Пискунов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №3. – С. 95–98.
2. Суй, И. Вычисление напряжений при расчете ступенчатого заклепочного соединения / И. Суй, Д.В. Бережной // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №3. – С. 91-94.
3. Суй, И. Исследование процессов деформирования кольца обделки тоннеля, расположенного в химически закрепленном грунте / И. Суй, Д.В. Бережной, А.А. Пискунов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №3. – С. 99–102.

В изданиях, индексируемых в системах WoS, Scopus.

4. Berezhnoi, D.V. Numerical modeling for deformation of frictional connector elements during the process of creation and exploitation / D.V. Berezhnoi, M.R. Shamim, I.S. Balafendieva, A.A. Sachenkov, Yingqian XU and L.R. Fakhrutdinov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol.1158, Art. 022024.
5. Berezhnoi, D V. Investigation of the effect of elastic-plastic loading modes in the manufacture of metal flywheels on their performance properties / D.V. Berezhnoi, A.A. Sachenkov and Xu Yingqian // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709, Art. 044018.
6. Yingqian, Xu. The Effect of Structure Bury Depth on Dynamic Response of Underground Tunnel under Longitudinal Shearing Seismic Action / Xu Yingqian, Qi Chengzhi and Chen Guoxing // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol.1020, P. 415–422.

Материалы докладов на научных конференциях.

7. Бережной, Д.В. Численное моделирование деформирования элементов фрикционных разъемов в процессе их создания и эксплуатации / Д.В. Бережной, М.Р. Шамим, И.С. Балафендиева, А.А. Саченков, Инцян Суй // XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург, 21-25 мая 2018 г.: Сб. материалов. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2018. – С. 28.
8. Балафендиева, И.С. Исследование влияние упругопластического деформирования материала фрикционного разъема на параметры его эксплуатации. / И.С. Балафендиева, В.В. Михеев, Л.Р. Секаева, И. Суй // Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского. Т.56 / Казанское математическое общество. «Лобачевские чтения-2018» // Материалы XVII молодежной научной школы-конференции. Казань: Издательство Казанского матем. о-ва, Изд-во Академии наук РТ, 2018. - Т. 56. – С. 46–47.
9. Бережной, Д.В. Численное моделирование деформирования фрикционного разъема при создании и эксплуатации / Д.В. Бережной, М.Ф. Шамим, С. Инцян // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций

и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. – М.: ООО «ТР-принт», 2018. – С. 42–43.

10. Сюй, И. Моделирование процессов вязкопластического деформирования элементов трехмерных конструкций /И. Сюй, Д.В. Бережной, И.С. Балафендиева // Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, Россия, Вятчи, 18.03.2019 – 22.03.2019, Т. 1. – М.: ООО «ТР-принт», 2019. – С. 195–196.

11. Балафендиева, И.С. Моделирование процессов вязкоупругого и упругопластического деформирования элементов трехмерных конструкций и сред / И.С. Балафендиева, Д.В. Бережной, А.А. Саченков, И. Сюй// Материалы XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, Россия, Вятчи, 16.03.2020 – 20.03.2020, Т. 1. – М.: ООО «ТР-принт», 2020. – С. 37–38.