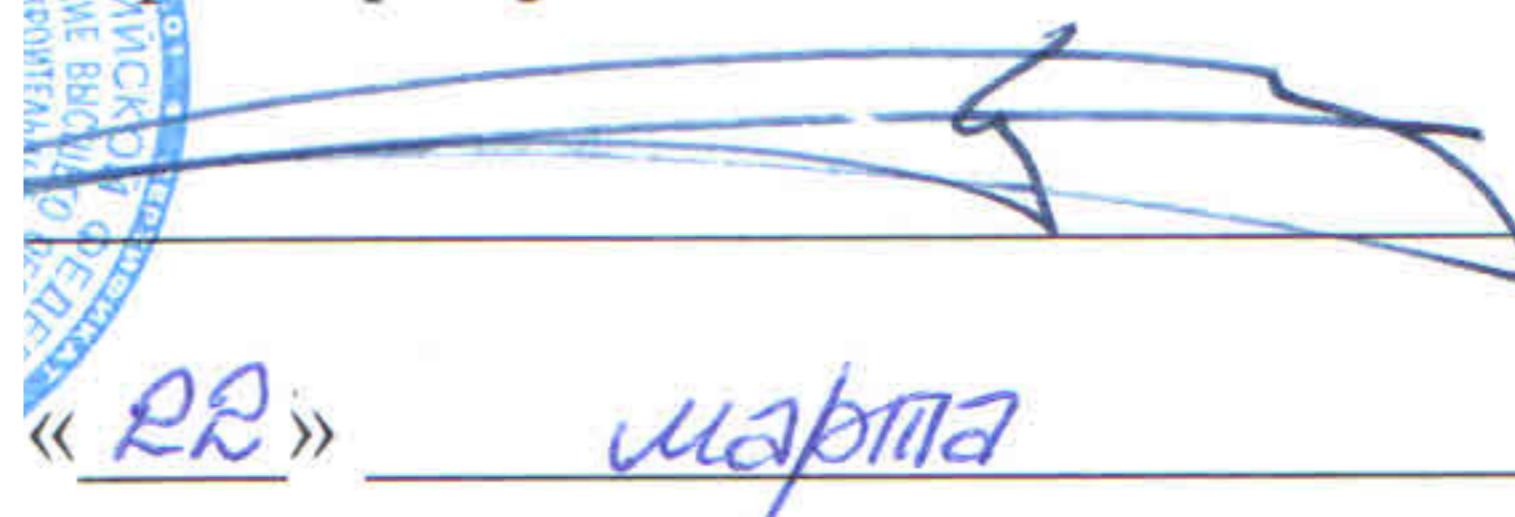


## УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
доктор технических наук  
Тер-Мартиросян А. З.



« 22 » марта

2023 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на диссертационную работу **Теличко Виктора Григорьевича**, выполненную на тему **«Деформирование пространственных комбинированных конструкций с учётом воздействия эксплуатационных сред и повреждаемости»** и представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика

**Актуальность темы.** За период интенсивного развития механики материалов, учитывающей чувствительность физико-механических характеристик к виду напряженного состояния, было предложено значительное количество работоспособных определяющих соотношений для разносопротивляющихся сред, базирующихся на различных технических гипотезах и теоретических предпосылках. Несмотря на это, оказалось, что физическая природа этого явления недостаточно исследована, а существующие теории далеко не всегда отражают реальное механическое поведение материалов.

Механические характеристики материалов склонных к дилатации активно проявляют чувствительность к виду напряженного состояния. Сюда можно отнести конструкционные графиты, бетон (железобетон), керамику и другие композитные материалы. Наблюдается дефицит моделей расчета конструкций из подобных материалов, эффективно и в полной мере учитывающих их особые физико-механические свойства. Особенно, при учете влияния дополнительных факторов, таких как воздействие агрессивных сред и температуры.

Одной из актуальных задач строительной механики, по-прежнему, остается задача учета совместной работы проектируемого здания или сооружения с деформируемым многослойным основанием. Несмотря на то, что необходимость подобного типа расчетов прямо указана в нормативных документах, например в Федеральном законе «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ, говорить о полной изученности данного вопроса и выработке исчерпывающих рекомендаций пока рано.

Теоретические модели, учитывающие указанные выше свойства материалов и воздействий, оказываются достаточно сложными для практической адаптации. Их аналитические решения, в подавляющем большинстве случаев, на сегодня неизвестны. Поэтому имеется настоятельная потребность в разработке новых вычислительных моделей, описывающих поведение конструкций в реальных условиях эксплуатации.

Действующая нормативная документация в области расчётного моделирования в строительстве однозначно требует учёта всех вышеперечисленных особенностей, определяющих возможность повышения точности прогноза поведения строительной конструкции. Что и определяет потребность в новых механико-математических моделях, а также средствах их использования в проектной и расчётной практике.

В связи с этим тему диссертационного исследования Теличко В.Г. «**«Деформирование пространственных комбинированных конструкций с учётом воздействия эксплуатационных сред и повреждаемости»** следует признать актуальной в теоретическом и прикладном плане.

**Структура и содержание диссертации.** На отзыв представлена диссертационная работа, состоящая из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 334 наименований и пяти приложений. Полный объем работы составляет 393 страницы, в том числе 317 страниц основного текста, содержит 15 таблиц и 187 рисунков.

Диссертация и автореферат написаны современным языком, на высоком научно-техническом уровне. Автореферат по своему содержанию соответствует основным положениям диссертации.

**Во введении** обоснована актуальность проблемы и выбор направления исследования, сформулированы цели и задачи, основные положения, приведена краткая аннотация всех глав диссертационной работы. В качестве цели диссертационного исследования заявлена разработка теории деформирования и прочности, а также создание практического исследовательского инструментария для изучения напряженно-деформируемого состояния, формирующегося при использовании материалов, обладающих зависимостью физико-механических характеристик от напряженного состояния, с учётом повреждаемости, воздействия химически активных эксплуатационных сред и температуры.

**Первая глава** содержит расширенный обзор литературы по проблеме теории деформирования и прочности, а также разработке практического инструментария для расчётного моделирования и анализа работы пространственных комбинированных конструкций, включающих в себя несущие элементы из нелинейных материалов. Свойства этих материалов зависят от компонентного состава тензора напряжений, с учётом получаемых механических повреждений и изменения физико-механических свойств под действием активных эксплуатационных сред.

**Во второй главе** анализируется возможность применения различных форм потенциала деформаций, который описывает поведение начально-изотропного, нелинейного разносопротивляющегося материала. Обоснован выбор оптимального представления потенциала деформаций, построенного в рамках методики нормированных пространств напряжений. Применяя систему гипотез, принятых при построении квазилинейных соотношений термоупругости и нелинейных потенциалов деформаций, формулируются две формы термодинамического потенциала Гиббса для существенно нелинейных разносопротивляющихся материалов.

**В третьей главе** формулируется методика решения задач механики разрушения отдельных элементов конструкций из материалов, свойства которых зависмы от напряженного состояния и имеющих различные значения механических характеристик на растяжение-сжатие. Исходя из гипотезы о распространении трещины, как причине разрушения несущего элемента строительной кон-

структур, и структуре процесса, который развивается при активизации её расширения, слияния с другими, образования микро-, а затем и макротрешин, рассматривается задача механики разрушения для несущих элементов из нелинейных материалов.

Формулируются уравнения для плоского напряжённого состояния, которые применяются для решения задач по исследованию процессов деформирования пластин с заданными дефектами в виде трещин определенного вида. Для апробирования созданной теоретической модели выбраны задачи представленные в известных работах А.В. Березина.

**В четвертой главе** диссертации приведена процедура формирования уравнений МКЭ для треугольного плоского гибридного многослойного конечного элемента с 3-я узлами и 5-ю степенями свободы в узле, применяемого для моделирования элементов конструкций, допускающих их представление в виде совокупности плоских элементов, с учётом особенностей механической работы композитных материалов, таких как железобетон. Рассмотрены дополнительные технические гипотезы и способы моделирования фиктивных слоёв в конечном элементе для учёта механической неоднородности по толщине.

Также, в данной главе, получена матрица жёсткости объёмного изопараметрического конечного элемента, имеющего форму тетраэдра, узлы дискретизации которого наделены тремя поступательными степенями свободы в глобальной системе координат. Этот конечный элемент используется для моделирования массивных объектов, таких как деформируемое грунтовое основание, пластины и оболочки, которые нельзя отнести к классу тонких или средней толщины. Рассмотрено его применение для ряда задач разной природы воздействий и уровня сложности: некоторые задачи по деформированию оболочек различной геометрической конфигурации из разносопротивляющегося материалов в условиях только механического нагружения; задача расчётного моделирования давления штампа на многослойное деформируемое полупространство; задача об определении НДС здания, работающего совместно с деформируемым многослойным основанием.

**В пятой главе** рассматриваются особенности применения метода конечных элементов для решения связанных задач термоупругости. Разъясняется физический смысл всех составляющих матриц разрешающей системы уравнений. Выделяются члены, учитывающие существенно нелинейную разносопротивляемость и зависимость коэффициентов линейного температурного расширения от вида напряжённого состояния. Описывается алгоритм пошагово-итерационного метода численного решения задач расчёта конструкций с учётом физической нелинейности и деформируемости расчётной схемы. Формулируются возможные граничные и начальные условия. Приводятся результаты расчётов напряжённо-деформированного состояния и температурного поля для сферических оболочек, а также прямоугольных в плане оболочек положительной гауссовой кривизны.

Строится новая математическая модель для определения НДС армированных слоистых пластин с учётом разносопротивляемости основного несущего слоя - бетона, повреждения его трещинообразованием, комплексного воздействия агрессивной хлоридсодержащей среды на защитный неармированный слой двойного назначения из эпоксидного полимербетона. Приведены результаты расчёта некоторых задач в сопоставлении с экспериментальными исследованиями Г. Баха и О. Графа, В. Гелера и Х. Амоса.

**Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:**

- используя единые определяющие соотношения для изотропных физически нелинейных разносопротивляющихся материалов и новые модификации конечных элементов предлагается обобщенный подход к решению задач по определению напряженно-деформированного состояния строительных конструкций;
- построено новое решение задач механики разрушения для тонких полу бесконечных пластин из материалов, по-разному работающих на растяжение и сжатие, а также с учетом изменения механических свойств материала в зависимости от реализованного в конкретной точке пространства напряженного состояния;

- на основе используемых потенциальных соотношений проведена новая теоретическая аппроксимация экспериментальных данных некоторых грунтов, доказана ее состоятельность;
- предложен подход для единого описания эффекта потери несущей способности вследствие воздействия эксплуатационных сред и механической повреждаемости;
- разработана новая механико-математическая модель для решения связанных задач термоупругости с применением единых потенциальных соотношений и новой модификации объемного конечного элемента, разработан алгоритм для нелинейного расчета по деформируемой схеме;
- построена новая математическая модель описания механического поведения железобетонных плит с защитным слоем, использующая плоские гибридные многослойные конечные элементы, которая позволяет учесть воздействие хлоридсодержащей среды на процессы повреждаемости и деформирования в целом;
- предложена новая математическая модель упругопластического деформирования многоэтажного здания на многослойном основании, учтено поведение армирующих элементов, повреждаемость и нелинейное механическое поведение материалов здания и грунтов;
- получены новые результаты решения практических задач, демонстрирующие значимые количественные и качественные эффекты, проявляющиеся при проведении нелинейных расчетов строительных конструкций, в том числе, при активном взаимодействии с внешними эксплуатационными средами.

**Научная и практическая ценность диссертации.** Разработанная и доведенная до уровня прикладных программ расчётная модель позволяет прогнозировать деформационные, теплофизические характеристики нелинейных начально-изотропных материалов и конструкций с учетом повреждаемости различной природы.

Разработанный прикладной исследовательский инструментарий представляет возможность дополнить и уточнить основные положения расчётных методик для конструкций из материалов, чувствительных к виду напряжённого

состояния, повысить качество и безопасность проектирования, оптимизировать экономическую составляющую.

Результаты диссертации могут использоваться в учебном процессе при подготовке и преподавании образовательных дисциплин магистратуры по направлению 08.04.01 «Строительство», различных профилей.

**Обоснованность и достоверность результатов диссертационного исследования** базируется на использовании признанной системы гипотез и теоретических моделей, входящих в число основных для строительной механики, механики деформируемого твёрдого тела и вычислительной механики, использовании подтвержденных экспериментальных данных и облечённых в математическую форму соотношений, которые ранее уже были признаны обоснованными. В диссертации используются получившие широкое распространение современные численные методы в модифицированной, но соответствующей базовым теоретическим положениям форме. В исследовании получены с заданной погрешностью результаты расчета напряженно-деформируемого состояния пространственных конструкций и их элементов в различных задачах, в том числе, в сравнении с достоверными данными экспериментов.

Предложенный практический инструментарий использует разработанные в диссертационном исследовании модификации конечных элементов в гибридной формулировке, реализованные в зарегистрированном расчётном комплексе, что дает возможность получения адекватных сходящихся решений с управляемой погрешностью.

**Апробация работы.** Результаты экспериментальных и теоретических исследований неоднократно докладывались и всесторонне обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, на научных семинарах. По теме диссертации опубликовано 65 научных работ, включая 5 статей, индексируемых в международных рецензируемых базах WoS и SCOPUS и 25 статей, в журналах из перечня ВАК РФ. Получено 3 свидетельства на программы для ЭВМ, опубликована 1 монография по теме исследований. Имеется справка о внедрении результатов диссертационного исследования.

**Личное участие автора** заключается в определении актуальной темы исследований, постановке цели, задач, планировании стратегии научных исследований, постановке вычислительных экспериментов, подборе оптимальных расчётных методик, анализе и обработке полученных числовых массивов результатов, написании основного текста диссертации, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании программ для ЭВМ, внедрении полученных результатов в инженерную практику. Автором диссертационного исследования разработан общий подход и практические инструменты в виде программ и алгоритмов для исследования проблемы деформирования пространственных комбинированных конструкций с учётом повреждаемости и воздействия внешних сред.

**Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки.** Теоретические результаты представленной работы обосновывают новое направление в развитии строительной механики, которое связывает в единое целое фундаментальные основы создания нелинейных механико-математических моделей, описывающих проявления существенно нелинейных механических свойств материалов несущих элементов строительных конструкций, влияния сложных внешних воздействий и получение числовых моделей поведения соответствующих расчётных схем.

Предложенный подход развит также в направлении создания необходимых модификаций численных методов строительной механики, обеспечивающих получение значений характеристик отклика расчётных схем строительных сооружений из материалов с усложнёнными механическими свойствами, в том числе, зависящими от вида напряжённого состояния. При этом реализован системный подход к расчету комбинированных конструкций, включающий учёт влияния структуры и свойств грунтового основания, а также его взаимодействия с несущим каркасом здания.

В рамках комплексности и перспектив сформулированного направления исследований строительной механики развивающийся подход обеспечен программным комплексом, применение которого позволяет, в том числе, получить

доказательную базу достоверности для спектра получаемых результатов на основе сравнения с имеющимися в источниках данными.

Также, имеются все основания утверждать, что выполнено обобщение классического подхода строительной механики в области механико-математического моделирования поведения систем типа «сооружение-основание», характеризующихся учетом механической работы материалов, проявляющих чувствительность к виду напряженного состояния, включая повреждаемость элементов и сложные виды внешних воздействий.

**Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и основных выводов.** Рекомендуется использовать практические и теоретические результаты диссертационной работы в деятельности научно-исследовательских организаций и проектно-конструкторских бюро, проектных организаций работающих в области строительства, занимающихся исследованием и проектированием элементов и конструкций в целом, выполненных из изотропных материалов, проявляющих склонность к наведенной разносопротивляемости и подвергающихся воздействию агрессивной эксплуатационной среды, температурным воздействиям, в частности, в КБ Приборостроения (г. Тула), РКК «Энергия» (г. Королев), НАК «Азот» (г. Новомосковск), ЦНИИСК, НИИЖБ, МГУ, МГСУ, МГТУ им. Баумана, ВГТУ, СПбГАСУ, ТулГУ и других.

**Соответствие диссертации научной специальности.** Диссертационная работа Теличко Виктора Григорьевича «Деформирование пространственных комбинированных конструкций с учётом воздействия эксплуатационных сред и повреждаемости» является завершенной научно-квалификационной работой и соответствует паспорту научной специальности 2.1.9. Строительная механика в части:

- п. 1. Общие принципы расчёта зданий, сооружений и их элементов на всех этапах жизненного цикла;
- п. 2. Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчёта;

- п. 4. Численные и численно-аналитические методы расчёта зданий, сооружений и их элементов на прочность, жёсткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях.

**По работе могут быть высказаны следующие замечания и пожелания:**

1. Вопросы сходимости применяемых методов в диссертации рассмотрены в весьма ограниченном объёме. Представлены только полученные эмпирическим путем графики сходимости расчетов методом конечных элементов. Результаты оценки сходимости для некоторых краевых задач в тексте диссертации вообще отсутствуют.

2. В диссертации рассмотрены одноразовые загружения железобетонных оболочек. Однако реальные железобетонные конструкции зачастую испытывают действие попеременного загружения и частичной разгрузки, например, при устранении с конструкции кратковременной нагрузки, а этот вопрос в диссертации не освещен.

3. В главе 4 п.4.5 рассмотрены экспериментальные данные и их теоретические аппроксимации для отдельных видов грунтов, которые далее применяются для расчетов напряженно-деформируемого основания. Не вполне ясно, зачем на диаграммах 4.55-4.59, приведено такое количество данных, потому как, согласно п. 2.2.1, для расчета констант используемого потенциала нужны только одноосные испытания.

4. В главе 4 п.4.2.4 при описании моделирования «фиктивных» слоев конечного элемента, заявлен учет нагельного эффекта деформирования арматуры в трещине, но совершенно неясно какое это имеет значение для решаемых задач и насколько учет данного фактора в принципе влияет на количественные оценки напряженно-деформированного состояния.

5. Автором диссертационного исследования рассмотрен только один вариант агрессивной среды – хлоридсодержащая среда, причем действующая исключительно на специально определенный слой из полимербетона, это, в перспективе, может ограничить область применимости результатов диссертационного исследования.

6. В обзоре указывается на существование множества определяющих соотношений для разносопротивляющихся материалов, в том числе, соотношения С.А. Амбарцумяна, А.В. Березина, Е.В. Ломакина, С.В. Bert, J.N. Reddy и других известных авторов. Однако в диссертации автор, для связанных температурных задач, проводит сравнение результатов только для упрощённого варианта рассмотренной модели с квазилинейной теорией Н.М. Матченко и А.А. Трещёва. Отсутствует и сравнение используемых зависимостей с другими моделями учёта зависимости свойств материалов от вида напряжённого состояния материала.

7. В алгоритме пошагового расчёта на рисунке 5.4 автор учитывает деформируемость контура оболочки путём пересчёта координат узлов после каждого шага нагружения, однако, о геометрической нелинейности в работе ничего не говорится.

Указанные замечания в основном объеме работы не снижают теоретическую и практическую ценность диссертации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа Теличко Виктора Григорьевича «Деформирование пространственных комбинированных конструкций с учётом воздействия эксплуатационных сред и повреждаемости» является завершённой самостоятельной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, обладающей научной новизной, теоретической и практической ценностью, а научные положения, выводы и рекомендации имеют существенное значение для развития соответствующей отрасли наук. Диссертация работа полностью соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842) для диссертаций, представленных на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Теличко Виктор Григорьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Отзыв рассмотрен и утвержден на расширенном семинаре кафедры «Строительная и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

По результатам обсуждения диссертации сформулировано положительное заключение. Присутствовало на заседании 19 человек, из них 4 доктора наук. Проголосовало за утверждение заключения – 19, против – 0.

Протокол № 8 от 07 марта 2023 г.

Заместитель заведующего  
кафедрой «Строительная и  
теоретическая механика», доцент  
кафедры «Строительная и  
теоретическая механика»,  
кандидат технических наук по  
специальности 05.23.17 –  
Строительная механика, доцент

Ганджунцев Михаил  
Иоакимович

Профессор кафедры  
«Строительная и теоретическая  
механика», директор института  
цифровых технологий и  
моделирования в строительстве,  
доктор технических наук по  
специальности 05.23.17 –  
Строительная механика, доцент

Филатов Владимир  
Владимирович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Адрес: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Телефон: +7 (495) 78

E-mail: kanz@mgsu

Подпись Ганджунца  
Маг. ЧРП

Филатова В.В. заверяю.  
И.Переведенчева