

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.т.н., профессора *Белостоцкого Александра Михайловича*  
на диссертационную работу *Теличко Виктора Григорьевича* на тему  
«*Деформирование пространственных комбинированных конструкций с учё-  
том воздействия эксплуатационных сред и повреждаемости*»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 2.1.9. *Строительная механика*.

### **Актуальность темы исследования**

Вопросы построения новых методов расчета несущих конструкций остаются актуальными в связи с требованиями постоянного повышения качества проектирования (и для иных стадий жизненного цикла) во всех областях техники, от авиа- и машиностроения до строительной отрасли. Методы расчета строительных конструкций в последнее время претерпевают существенные изменения, связанные с прогрессом в области обеспечения автоматизации расчетов и постоянным усложнением расчетных схем конструкций. Основные усилия направлены на совершенствование расчетных методик и процедур в задачах расчета конструкций в нелинейной стадии деформирования.

Действующая нормативная документация в области расчётного моделирования в строительстве требует учёта всех особенностей, определяющих возможность повышения точности прогнозной оценки напряжённо-деформированного состояния строительной конструкции. Что также подчеркивает потребность в новых механико-математических моделях и средствах их использования в расчётной практике.

Представленная соискателем ученой степени работа посвящена вопросам разработки теории деформирования и прочности пространственных комбинированных конструкций из начально-изотропных материалов, чьи деформационно-прочностные характеристики зависят от вида напряженного состояния, а также отдельных конструкций и их фрагментов, в том числе с учётом воздей-

ствия химически активной эксплуатационной среды, температурных воздействий, армирования и повреждаемости в форме трещинообразования.

### **Структура и содержание работы**

Содержание работы развивается от теоретических построений, обосновывающих выбранные автором теоретические положения и методы решения прикладных задач, к примерам задач строительной механики, подтверждающим развиваемую теорию. Автором предложен единый подход для математического моделирования механической работы пространственных строительных конструкций, основанный на использовании эффективных определяющих соотношений для изотропных дилатирующих материалов, чувствительных к виду напряженного состояния, и применении метода конечных элементов.

Представленная на отзыв диссертационная работа состоит из введения, 5-и глав, заключения, библиографического списка и 5-и приложений. Полный объем работы составляет 393 страницы, в том числе, 187 рисунков и 15 таблиц. Библиографический список содержит 334 источника.

Во введении обосновывается актуальность решаемой в диссертации проблемы, выбор направлений исследования, сформулированы цели и задачи, приведены основные положения, приведено содержание всех разделов диссертационной работы.

В первой главе представлен расширенный обзор литературы по проблеме теории деформирования и прочности, а также вопросов создания практического инструментария для расчётов пространственных комбинированных конструкций из материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния, с учётом повреждаемости и изменения физико-механических свойств под действием агрессивных эксплуатационных сред и температуры.

Во второй главе рассмотрены потенциальные соотношения для начально-изотропных, существенно нелинейных материалов, чьи физико-механические свойства зависят от параметров напряженного состояния, полученные в рамках применения методики нормированных пространств напряжений.

На основе гипотез, принятых при построении квазилинейных соотношений термоупругости и нелинейных потенциалов деформаций Н.М. Матченко и А.А. Трещёва, приводится построение двух форм термодинамиче-



ского потенциала Гиббса для существенно нелинейных изотропных разносопротивляющихся материалов.

В третьей главе формулируется подход к решению задач механики разрушения материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния, имеющих различные значения механических характеристик на растяжение и сжатие.

В диссертации рассматривается задача об осесимметричном плоском напряжённом состоянии тонкой полубесконечной пластинки. Сформулированы уравнения состояния разносопротивляющихся материалов для плоского напряжённого состояния. С использованием указанных соотношений, а также методики исследования трещинообразования для материалов, чьи свойства зависят от вида напряжённого состояния, получены разрешающие дифференциальные уравнения, описывающее плоское напряжённое состояние тонкой пластинки с учётом повреждаемости в форме: 1) трещины поперечного сдвига, 2) нормального разрыва.

В четвертой главе диссертации приведена процедура построения уравнений метода конечных элементов для треугольного плоского гибридного 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 слоев в конечном элементе для учёта механической неоднородности по толщине. Рассмотрены преимущества гибридной вариационной формулировки метода конечных элементов.

Получена матрица жёсткости для изопараметрического четырехузлового конечного элемента в форме тетраэдра с тремя поступательными степенями свободы в узле, предназначенного для моделирования объектов, для которых необходимо применение положений трехмерной теории упругости. Решен ряд прикладных задач по моделированию оболочек различной геометрической конфигурации, выполнен расчёт штампа на грунтовом основании, решена задача об упругопластическом деформировании многоэтажного здания на четырёхслойном деформируемом основании.

В пятом разделе рассматриваются особенности применения разработанного ранее объемного конечного элемента к решению связанных задач термоупругости.

В первой части пятой главы разъясняется физический смысл всех составляющих основного уравнения метода конечных элементов, учитывающих существенно нелинейную разнсопротивляемость и зависимость коэффициентов линейного температурного расширения от параметров напряжённого состояния. Описывается алгоритм пошагово-итерационного метода численного решения задач расчёта конструкций с учётом физической нелинейности, в том числе, при проведении расчёта по деформируемой схеме. Выписаны возможные граничные и начальные условия, применительно к решаемым в диссертации задачам. Приводятся основные результаты численного моделирования оболочек различной геометрической конфигурации.

Во второй части пятой главы строится новая математическая модель для определения напряженно-деформированного состояния армированных плит с защитным слоем из полимербетона, с учётом разнсопротивляемости, повреждаемости в форме трещинообразования, комплексного воздействия химически активной среды на защитный слой. Приведены результаты расчёта некоторых модельных задач в сопоставлении с экспериментальными исследованиями.

В заключении сформулированы основные результаты и общие выводы по результатам выполненной в диссертации работы.

В приложениях приведены дополнительные результаты решения прикладных задач и свидетельства о регистрации разработанных программ для ЭВМ, справка о внедрении результатов диссертационной работы в инженерную практику.

В целом автором получены существенно новые результаты исследований по проблеме деформирования комбинированных конструкций, системы «здание-основание» и их отдельных компонентов в условиях воздействия агрессивной внешней среды или температурного нагружения, с учётом зависимости механических свойств грунтов и материалов от параметров напряжённого состояния и повреждаемости в результате деградации или образования трещин в конструкциях.



## **Научная новизна исследований**

1. Предложен новый обобщённый подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния пространственных конструкций из существенно нелинейных начально-изотропных материалов, чьи механические характеристики ощутимо зависят напряжённого состояния. Предложены и обоснованы новые модификации соответствующих конечных элементов.

2. Построено новое решение задачи механики разрушения для тонкой полубесконечной пластины из разносопротивляющегося материала с дефектами в виде трещин, с учетом изменения механических свойств материала в зависимости от реализованного в точке напряженного состояния.

3. На основе используемых потенциальных соотношений проведена теоретическая аппроксимация экспериментальных данных для некоторых грунтов. Предложена математическая модель упругопластического деформирования многоэтажного здания на деформируемом основании, с учётом повреждаемости и нелинейного механического поведения материалов здания и грунтов.

4. Разработана новая математическая модель для решения связанной задачи термоупругости с применением единых потенциальных соотношений и новой модификации объёмного конечного элемента, разработан алгоритм для проведения нелинейного расчета по деформируемой схеме.

5. Построена новая механико-математическая модель описания механического поведения армированных плит с защитным слоем, использующая новую адаптацию гибридных многослойных конечных элементов, которая позволяет учесть воздействие хлоридсодержащей среды на процессы повреждаемости и деформирования композита в целом.

6. Получены новые результаты решения прикладных задач, демонстрирующие новые количественные и качественные эффекты, проявляющиеся при нелинейном деформировании строительных конструкций и их компонентов, в том числе, при взаимодействии с химически активными эксплуатационными средами, а также в условиях термомеханического нагружения.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретические результаты представленной работы обосновывают новое направление в развитии строительной механики, которое связывает в

единое целое основы создания нелинейных математических моделей в механике, описывающих проявления нелинейных механических свойств материалов и несущих элементов строительных конструкций, влияния сложных внешних воздействий и получение численного описания поведения соответствующих расчётных схем.

Также диссертация содержит новые положения для создания необходимых модификаций численных методов строительной механики, обеспечивающих получение более точных характеристик расчётных схем строительных конструкций и их элементов из материалов с механическими свойствами, зависящими от вида напряжённого состояния. При этом реализован системный подход к расчету комбинированных конструкций, включающий учёт влияния неоднородной структуры и свойств грунтового основания, взаимодействия с несущим остовом сооружения.

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. Исследовательский инструментарий предоставляет возможность дополнить и уточнить основные положения расчётных методик для конструкций, повысить качество и безопасность проектирования.

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

Практическую ценность работы подтверждает внедрение результатов работы в расчетную практику проектной организации: ООО «Строительное проектирование» (г. Тула). Соответствующая справка приведена в приложении №5 к тексту диссертации.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность результатов подтверждается использованием фундаментальных положений строительной механики, строгой и конкретной постановкой задач, строгостью математических формулировок, применением известных многократно апробированных численных методов решения краевых задач.



Постановки и методы решения задач также базируются на законах и принципах строительной механики, механики деформируемого твердого тела, вычислительной механики и не противоречат известным экспериментальным результатам и теоретическим положениям.

Выводы подтверждаются сравнением полученных результатов с известными из научной литературы по специальности теоретическими и экспериментальными данными.

### **Публикации, отражающие основное содержание работы**

Все основные результаты диссертации, выносимые автором на защиту, опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, внесенных в перечень журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ, а также докладывались на научных конференциях международного и всероссийского уровня. По теме диссертации опубликовано 65 работ, в том числе 5 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus; 24 научных статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ; опубликована 1 монография. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Замечания и предложения**

1. Глава 3 демонстрирует впечатляющие навыки автора в аналитических методах механики и разностных схемах численной реализации, но не выглядит, на наш взгляд, столь уж необходимой и органичной в составе диссертации.

2. В приведенном обзоре и в главе 4, при обосновании выбора метода конечных элементов (МКЭ) в качестве базового инструмента численных исследований, подразумевается МКЭ в *форме метода перемещений*. Но об этом нет явного авторского упоминания и мнения.

3. Решение задач в сложных связанных и/или нелинейных постановках потребовало реализации «авторских» конечных элементов – плоского пластинчато-оболочечного гибридного и объемного изопараметрического семейства. А как же с важнейшим классом КЭ для комбинированных строительных конструкций – балочно-стержневым (колонны, балки, сваи, ...)?

4. При ссылке на «тяжелый» программный комплекс ANSYS Mechanical (для целей сравнения с авторскими результатами) было бы вполне уместно указать на его верификацию в системе RAASН на целевом классе задач.

5. Используемые принципы верификации/валидации сложных, в том числе, нелинейных, КЭ-моделей и решений вызывают вопросы. Показательный фрагмент выводов автора: «...учёт особых, неклассических эффектов работы материалов, в том числе для железобетона, позволяет получить уточнение по значениям различных характеристик НДС на величину в среднем до 21%. Это значение зависит от использованных значений характеристик материала по сравнению с характеристиками, назначаемыми в рамках упрощённых теорий работы основания и моделирования свойств бетона». Что такое «уточнение» (в сравнении с экспериментом, «натурой»?) и как же оно может быть доказательно достигнуто, если «зависит от использованных значений характеристик материала»?

6. Принцип доказательности, «правило хорошего вычислительного тона» при расчетах системы «основание-здание» (и сравнение результатов по разным подходам и программным комплексам) требует на первом шаге провести сравнение в линейно-упругой постановке (а не сразу в нелинейных).

7. В весьма обстоятельном «Заключении» ничего не сказано о видимых/желаемых автором перспективах дальнейших исследований и разработок в развитие докторской диссертации. Было бы интересно...

8. В «Списке литературы» представлены в основном, а в «иностранной» его части – доминируют – работы прошлого столетия (если не принимать во внимание публикации научной школы автора и «родственные» им), что вызывает некоторое удивление и несогласие, имея в виду очевидную актуальность темы диссертации.

9. Замечены некоторые вольности в терминологии, например: «Напряженно-деформируемое состояние», «числовая модель», «...толщина на *несколько порядков меньше...*», ... Есть также некоторые оформительские и стилистические/орфографические погрешности.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации. К сожалению, часть графиков плохо читаема.



Приведенные замечания и предложения не ставят под сомнение основные результаты, полученные автором, и не влияют значительно на безусловно положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа *Теличко Виктора Григорьевича* является научно-квалификационной работой, самостоятельно выполненной на актуальную тему, содержащей научные результаты, выводы и рекомендации, отличающиеся доказанной новизной. Диссертация на тему «Деформирование пространственных комбинированных конструкций с учётом воздействия эксплуатационных сред и повреждаемости» отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.) для диссертаций, представленных на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор *Теличко Виктор Григорьевич* заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

### **Официальный оппонент**

Академик РААСН, доктор технических наук (05.23.07 – «Гидротехническое и мелиоративное строительство»), профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», профессор



Белостоцкий  
Александр  
Михайлович

28.03.2023

Адрес: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Тел: +7 (495) 780-0000

e-mail: amb@stadyo.ru

ПОДПИСЬ Белостоцкого А.М.  
ЗАВЕРЯЮ  
ДИРЕКТОР ЦК И ДС  
С.Н. КОРЖИН

