

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

доктора технических наук, доцента Галишниковой Веры Владимировны  
на диссертационную работу Литвинова Степана Викторовича  
на тему «Нелинейное термовязкоупругое деформирование толстостенных  
цилиндрических непрерывно неоднородных тел», представленную к защите на  
соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9.  
Строительная механика.

*Актуальность диссертационного исследования.* Интерес к использованию полимерных материалов в строительстве возник еще в 60-е годы 20 столетия. В это время появились первые цельнопластмассовые дома, воздухоопорные сооружения, светопрозрачные конструкции, в том числе оболочечные, и т.д. В 21 веке интерес к использованию полимеров и полимерных композитов неуклонно растет, что связано, во-первых, с целым рядом их неоспоримых достоинств, а во-вторых – с развитием технологий, позволяющих минимизировать их недостатки. В ряде случаев применение полимерных материалов является необходимым, например, в условиях агрессивных сред. В качестве примеров можно привести защитные оболочки атомных реакторов, оболочки подземных коллекторов, дымовые трубы, емкости и т.д.

Полимеры находят широкое применение в качестве связующего в композиционных материалах – полимербетонах или древесно-композитных материалах, имеющих высокую сопротивляемость воздействию агрессивных сред и высокие механические свойства. Особый интерес представляет использование полимеров и полимерных композитов в медицине. Свойства таких композитных материалов во многом определяются полимерным связующим, обладающим рядом особенностей: существенной зависимостью физико-механических параметров от внешних физических полей, значительной ползучестью особенно по отношению к упругой компоненте деформации и т.д. В связи с расширяющимся применением полимерных и полимеркомпозитных материалов, особое значение приобретают исследования их физико-механических свойств и формулирование современных математических и вычислительных моделей поведения конструктивных элементов из этих материалов. Таким образом, представленная диссертационная работа,

посвященная исследованию нелинейного деформирования полимерных конструктивных элементов с учетом температурных воздействий, является весьма актуальной.

***Общая характеристика, структура и завершенность диссертационной работы.***

Диссертация С.В. Литвинова состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и четырех приложений. Работа изложена на 299 страницах, и содержит 119 рисунков и 28 таблиц. Список использованной литературы включает 237 источника. В приложении представлены некоторые теоретические выкладки и результаты практической реализации в виде актов внедрения и свидетельств государственной регистрации программы для ЭВМ. Содержание работы полностью соответствует заявленной специальности 2.1.9. Строительная механика.

***Во введении*** автором обоснована актуальность темы диссертационного исследования, оценена степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены основные новые черты проведенного автором исследования, описана его научная новизна, и представлены основные положения, выносимые автором на защиту. Указан личный вклад автора в результаты исследования.

***В первой главе*** автор анализирует состояние исследований в области механики полимеров, в том числе модифицированных. В последующих разделах главы приведена сводка основных уравнений, использованных автором в диссертационной работе для вывода разрешающих уравнений рассматриваемых задач. Приведены основные уравнения механики деформируемого твердого тела в цилиндрической системе координат, уравнения теории поля, выполнен переход от дифференциальных уравнений краевой задачи к ее интегральной записи. Приведены также основные положения метода конечных элементов и метода конечных разностей, при помощи которых осуществляется построение численных решений.

***Во второй главе диссертации*** изложена методика определения параметров уравнения состояния на основе обработки параметров экспериментальных кривых. Коэффициенты известного уравнения Максвелла-Гуревича определяются с учетом релаксации напряжений в конструктивных элементах, путем численной обработки кривых ползучести или релаксации полимера. Автор приводит краткий аналитический обзор существующих математических моделей ползучести вязкоупругих материалов, а также их реализации в ведущих современных программных комплексах. На основе анализа ограничений существующих моделей,



автором обоснована необходимость выбора в качестве основного уравнения состояния нелинейного обобщённого уравнения Максвелла–Гуревича, а также разработки на основе построенной модели алгоритмов и программных модулей расчета напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов из полимеров и полимерных композитов. Далее в главе автор использует разработанную методику для определения физико-механических параметров эпоксидного связующего ЭДТ-10 как функцию от уровня начальной полной относительной деформации и значения температуры, а также физико-механических параметров бетона как функции от отношения напряжения к расчётному сопротивлению бетона на сжатие.

*В третьей главе* работы рассмотрено моделирование напряженно-деформированного состояния полимерных цилиндров при различных режимах механического и температурного воздействия. Задача сведена к одномерной путем ее аппроксимации плоским деформированным и плоским напряженным состоянием. Решение получено аналитическим методом, а также численными методами конечных разностей и конечных элементов. Выполнены решения модельных задач по описанным во второй главе методикам. Автору удалось продемонстрировать хорошее совпадение решений, полученных по методу конечных разностей и конечных элементов, как для напряжений, так и для перемещений и деформаций ползучести. Рассмотрен ряд вычислительных приемов, позволяющих повысить точность решения, что подтверждено рядом модельных задач.

*В четвертой главе* автор исследует особенности напряженно-деформированного состояния полимерных толстостенных цилиндров при различных воздействиях: ионизирующего излучения, температурных полей, силовых воздействий, а также искусственной неоднородности, создаваемой путем введения добавок. Приведены физико-механические параметры полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), полученные автором на основе обработки кривых релаксации напряжений как функция от двух переменных: уровне воздействующего уровня гамма-излучения и долей добавки гидроксиапатита. Исследование влияния ионизирующего облучения представляет значительный интерес, так как под его воздействием происходит существенное изменение свойств материалов, как полимерных, так и композитных, в том числе бетонов. Изучение влияния добавок на изменение физико-механических свойств вяжущего (полимера) тоже весьма важно, поскольку оно используется в составах композиционных материалов, например,

полимербетонах. Получив указанные зависимости, автор ставит, и решает задачу об изменении физико-механических свойств материала цилиндра в зависимости от распределения добавок по радиусу, таким образом, чтобы изделие было равнонапряженным или равнопрочным. Исследуется поведение равнонапряженного цилиндра в процессе ползучести. Следует отметить, что в настоящее время подобные исследования носят скорее теоретический характер вследствие отсутствия необходимых технологий точного распределения добавок. Однако в целом данное направление представляется весьма перспективным. В главе приведено решение практических задач определения напряженно-деформированного состояния толстостенного цилиндра при различных воздействиях, а также ряда модельных задач, подтверждающих достоверность и точность получаемых решений. В заключение главы приведено решение важной практической задачи - расчёт бетонного экрана защиты корпуса реактора на действие ионизирующего излучения и внутреннего источника тепла.

*Пятая глава* диссертации посвящена разработке конечно-элементной модели рассматриваемых тел, матрица жесткости и вектор нагрузок которой включают коэффициенты, учитывающие температурные деформации и деформации ползучести материала. Следует отметить, что автору удалось выполнить аналитическое интегрирование функционала полной потенциальной энергии, не прибегая к численному интегрированию. В главе также приводится решение интересной практической задачи оценки остаточных напряжений в полимерном цилиндрическом изделии, получаемом методом экструзии, в материале которого возникает градиент температурного поля за счёт различного контакта открытых поверхностей с воздушной средой и последующим остыванием. Результаты решения при различных временах остывания продемонстрировали, что развитие деформаций ползучести в полимерном изделии приводит практически к нулевым значениям остаточных напряжений, соответственно, при расчёте подобных элементов строительных конструкций вполне справедлива применяемая гипотеза о том, что возможными внутренними напряжениями можно пренебречь.

*В шестой главе* диссертации приведены исследования длительной прочности адгезионного соединения на нормальный отрыв. Подобные соединения широко используются в строительной отрасли. В отличие от проводимых ранее исследований, в диссертации не используется гипотеза об отсутствии деформаций ползучести в пограничных слоях полимера. Автор решает задачу в двумерной постановке,



подробно исследуя карту развития деформаций и напряжений как в полимерном материале, так и в склеиваемом теле. Учёт развития деформаций ползучести показывает, что с течением времени даже в эпоксидном компаунде развиваются деформации ползучести, приводящие к релаксации напряжений, и увеличению срока службы соединения. Расчёты, выполненные для различных температурных режимов, демонстрируют, что температура влияет в большей степени не на уровень напряжений, а на время, когда произойдет или релаксация напряжений в полимере и установление некоторого окончательного напряжения, или достижение критической интенсивности напряжения и разрушение моделируемого соединения. В последних разделах главы описаны экспериментальные исследования по оценке прочности адгезионного соединения, результаты которых сопоставлены с теоретическими данными. При этом максимальное расхождение результатов составило 11% по прочности в течение одних суток.

В *заключении* на основе полученных результатов приведены итоги выполненного исследования, и сформулированы их основные особенности.

*Приложение* состоит из четырёх частей, и включает: основные формулы для матричных операций; значения коэффициентов матрицы жёсткости и вектора нагрузки полученного в пятой главе конечного элемента; копии свидетельств регистрации программ ЭВМ и копии актов внедрения.

*Научная новизна диссертационного исследования* заключается, на наш взгляд, в следующих основных результатах, полученных автором:

- разработке методики определения физико-механических параметров уравнения состояния на основе обработки кривых релаксации материала;
- разработке методики определения функциональных зависимостей изменения физико-механических параметров материала изделия от уровня добавки в композит с целью создания равнонапряжённого и равнопрочного цилиндрического конструктивного элемента;
- разработке методики решения, алгоритма и программы расчёта на ЭВМ двумерной задачи моделирования напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки при произвольных граничных условиях на торцевых поверхностях под действием статических нагрузок и физических полей;

- разработке конечно-элементной модели поведения толстостенных цилиндрических оболочек, учитывающей температурные деформации, эффект ионизирующего излучения и деформации ползучести материала;
- разработке математической и вычислительной модели определения остаточных напряжений и деформаций извлекаемого из экструдера изделия;
- разработке модели оценки длительной прочности адгезионного соединения в двумерной постановке с учётом развития деформаций ползучести в полимерном связующем.

**Достоверность** результатов проведенных исследований подтверждается как корректным использованием фундаментальных положений механики деформируемого твердого тела, апробированных методов строительной механики и вычислительной математики; так и сравнением результатов, полученных в тестовых задачах с использованием разных численных методов и аналитических решений, полученных автором или другими учеными.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научные положения и выводы, приведённые в работе, обоснованы тщательным анализом состояния вопроса, а также проведенными автором собственными теоретическими исследованиями и разработками, подкрепленными выполнением численных и натурных экспериментов. Приведенные рекомендации аргументированы, и соответствуют результатам исследования.

**Ценность результатов работы для науки и практики.**

**Теоретическая значимость** полученных результатов заключается в развитии теоретических положений и создании методик в области нелинейного расчёта конструктивных элементов, выполненных из полимерных и полимеркомпозитных материалов, с учетом силовых и температурных воздействий, а также воздействия ионизирующего излучения.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности применения разработанных методик и компьютерных программ в проектных организациях для определения физико-механических параметров материала на основе обработки экспериментальных кривых релаксации, а также для исследования напряженно-деформированного состояния реальных конструкций толстостенных цилиндрических оболочек, выполненных из полимерных или композитных материалов и находящихся



под силовыми воздействиями в сочетании с температурными полями и ионизирующим излучением. Полученные результаты могут также быть использованы при создании отечественного расчетного программного комплекса. Следует отметить, что результаты диссертационного исследования получили практическое внедрение, подтвержденное соответствующими актами.

***Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научных изданиях.***

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 60 печатных и электронных работах, в том числе: в ведущих рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ — 21 статья; в отечественных изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science — 4 статьи; в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science — 16 статей; в прочих периодических изданиях — 10 статей. Результаты исследования вошли в 4 монографии. Получено 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

***Соответствие работы паспорту специальности.***

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.1.9. Строительная механика, а именно: п. 2 «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета», п. 4 «Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость и динамику при силовых, температурных и других воздействиях», п. 11. «Экспериментальные методы исследования зданий, сооружений и их элементов».

***Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.***

Автореферат дает достаточно полное представление о выполненном автором исследовании, хорошо структурирован, и снабжен иллюстрациями. В автореферате отражены основные положения диссертации.

***Замечания по работе.***

1. Во введении диссертации в явном виде не сформулированы объект и предмет исследования, что затрудняет систематическое изучение материала.

2. Раздел 2.4 второй главы изложен недостаточно четко. В результате сложно понять, какие именно результаты получены автором при исследовании задачи, и как на их основе сформулированы рекомендации. Рисунок 2.18 озаглавлен «сваи из

эпоксидной смолы», однако на фото показан рабочий винт сваи из армированного бетона.

3. Предложенные автором аппроксимации физико-механических параметров проведены для определенного диапазона опытных данных. Что делать, если необходимо определить физико-механические параметры от произвольных переменных вне рассмотренного диапазона? Автором данный вопрос не затрагивается.

4. В разделе 4.1 автором рассматривается влияние ионизирующего излучения на материал изделия. В общем случае возможна как деструкция, так и сшивка макромолекул полимера, что с учётом термической предыстории изготовления образцов может приводить к неоднозначным результатам. Вопрос требует более тщательной проработки и обоснования.

5. В пятой главе моделируются 2 промежутка времени, в течение которых происходит извлечение образца из экструдера: образец остывает: 22 мин и 72 мин. Нигде не поясняется, на основании чего была выбрана скорость выхода изделия.

6. На диаграммах, приведенных в третьей главе (рисунки 3.5-3.10) невозможно различить результаты, полученные по методу конечных разностей и методу конечных элементов, сетки практически сливаются.

7. На странице 82 имеется отсылка к рисунку 2.83, который в главе отсутствует.

8. Имеются редакционные погрешности в тексте – несогласованность слов в предложении, опечатки.

Указанные замечания не снижают ценности работы, носят рекомендательный или дискуссионный характер и служат пожеланиями для дальнейшей разработки темы исследования. Диссертация в целом выполнена на высоком научном уровне, изложена последовательно, в хорошем научном стиле.

### **Заключение**

Диссертационная работа Литвинова Степана Викторовича «Нелинейное термовязкоупругое деформирование толстостенных цилиндрических непрерывно неоднородных тел» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований развиты теоретические основы и созданы методики нелинейного расчета конструкций, выполненных из полимерных и полимеркомпозитных материалов, с учетом силовых



и температурных воздействий, а также воздействия ионизирующего излучения, что в целом может быть квалифицировано как научное достижение.

Диссертационная работа отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), представленных на соискание ученой степени доктора наук, а её автор Литвинов Степан Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Я, Вера Владимировна Галишникова, настоящим даю согласие на автоматизированную обработку моих персональных данных в документах, связанных с работой диссертационного совета.

Официальный оппонент:  
доктор технических наук (05.23.17  
(2.1.9) – Строительная механика),  
доцент, профессор кафедры СиТМ,  
проректор НИУ МГСУ  
Email: GalishnikovaVV@mgsu.ru  
Телефон: 8(495)025-29-38

Галишникова Вера Владимировна

28.08.2024г.

Подпись В.В. Галишниковой заверяю

Начальник отдела  
кадрового делопроиз-  
водства УРП  
  
А.В. ПИЧЕГИН



#### Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26 ; Email: [kanz@mgsu.ru](mailto:kanz@mgsu.ru); Телефон: +7 (495) 781-80-07; Сайт: <https://mgsu.ru/>