

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора технических наук, профессора кафедры «Теоретическая механика» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» на диссертационную работу Языева Сердара Батыровича «Развитие методов расчета на устойчивость вязкоупругих стержней и пластин в условиях нелинейного деформирования», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Для рецензирования диссертационной работы в виде отзыва соискателем были представлены все необходимые материалы в электронном и печатном виде. Что же касается содержательной части диссертации то изучение и анализ этих материалов показали следующее:

### **1. Актуальность темы исследования.**

Рецензируемая работа посвящена устойчивости стержней и пластин в условиях ползучести при термосиловом воздействии. Снижение материалоемкости, характеризующееся отношением критической силы к массе стержня, стало актуальным в период развития авиа - и ракетостроения. Результаты расчета устойчивости стержней переменного сечения, связанные с этой проблемой, нашли отражение во многих исследованиях, как у нас в стране, так и за рубежом. Однако рекомендаций по выбору эффективной формы стержней практически обнаружить не удалось.

Реальные стержневые элементы конструкций или оболочки всегда обладают некоторой начальной погибью. Начальная погибь при этом играет роль возмущения, влияющего на поведение стержня или пластины. Исследование несовершенных систем важно, прежде всего, с практической стороны, т.к. позволяет приблизить расчетную схему к реальной конструкции.

Теоретические исследования С.Б. Языева, обобщенные в его докторской диссертации, по своей сути представляют собой решения задач об устойчивости стержней и пластин механики полимеров, характерной особенностью которой является учёт специфики релаксационных свойств полимерных материалов. Соискатель учитывает в расчетах способы закрепления, косвенную неоднородность материала стержня и пластины, вызванную температурным воздействием по его оси,

и переменную жесткость сечения по длине стержня. Несомненно, такая постановка исследований, является **актуальной**.

Поскольку композиты на основе полимерных материалов находят широкое применение в машиностроении, строительстве, самолето- и кораблестроении представление к защите этой работы в области строительной механики на соискание ученой степени кандидата технических наук оправдано.

Имеющиеся теоретические работы основаны главным образом на линеаризованных физических соотношениях, которые не позволяют полностью описать механическое поведение полимеров в условиях их эксплуатации. Стремление к более полному их описанию приводит к необходимости применения нелинейных физических соотношений.

Что же касается содержательной части диссертации, то здесь надо отметить следующее. Дело в том, что различные задачи устойчивости механики полимеров в различных постановках во множестве рассматривались в литературе. Поэтому при оценке полученных результатов, да и при квалификационной оценке диссертанта, важно понять уровень оригинальности исследований.

Именно с этих позиций в настоящем отзыве рассматривается диссертационная работа С.Б. Языева

Выбранное соискателем направление исследования представляет собой дальнейшее развитие, как строительной механики, так и механики полимеров.

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна.**

В любой научной работе новизна состоит в выявлении ранее неизвестных фактов или упомянутых выше особенностей, в разработке теоретических и экспериментальных методов их обнаружения. В рассматриваемой работе научная новизна, на мой взгляд, проявилась в том, что автор подошел к рассмотрению поставленных перед ним задач с использованием не только численно-аналитических, но и классических методов расчета, в частности, метода Ритца- Тимошенко, метода Бубнова-Галеркина, энергетического метода. Соискатель делает попытку использовать данные методы для задач устойчивости стержней и пластин переменной жесткости с учетом выраженных реологических свойств материала.

Все предложенные ранее варианты математических моделей геометрически и физически нелинейной сплошной среды являются приближенными и не лишены внутренних противоречий. Для современного этапа развития науки характерен переход от расчётных методик к математическому моделированию. Наиболее часто используются математические модели в виде различного рода уравнений, ограничений и т.д., причем учет влияния тех или иных факторов накладывает

отпечаток на степень соответствия модели исходному объекту. Вместе с тем требование внутренней непротиворечивости математической модели должно быть строго обосновано конечной целью расчёта, а логические противоречия в модели могут быть допустимы, если обусловленные ими ошибки в расчётах не выходят за рамки погрешности, следующей из принятых в модели допущений физического характера.

В диссертационной работе разработана новая эффективная методика определения реологических параметров материала, в частности, метод нелинейной оптимизации, позволяющая выполнять расчеты с учетом изменения свойств материала под действием температуры

Одновременно диссертант учитывает влияние следующих факторов: способ закрепления стержня, начальную погибь, температурное воздействие и, как следствие, неоднородность материала стержня. Кроме того, в отличие от многих других авторов, в основе работы не лежит какое-то одно уравнение связи, а предложенная методика позволяет рассматривать вопросы потери устойчивости для различных теорий и уравнений связи деформаций и напряжений, что очень существенно, в свете их огромного количества.

При решении проблемы устойчивости при ползучести основной критериальной величиной является не нагрузка, а критическое время, которое можно определить, как соответствующее некоторому значению для стрелы прогиба.

Теоретические результаты получены вполне корректно, и сделанные на основании этого выводы относительно потери устойчивости не вызывают возражений. Однако к выводу о том, что «младший» спектр времен релаксации превалирует над «старшим» для непродолжительных процессов ползучести, следует подойти с осторожностью, поскольку в задачах напряженно-деформируемого состояния конструкций или ее элементов из полимера картина противоположная. Возможно в задачах устойчивости — это не так.

Нелинейность уравнений связи в совокупности с зависимостью параметров уравнений от координат и вида среды, а также протекание процессов во времени ставит с особой остротой проблему устойчивости расчета и получения надежных, в данном случае новых результатов.

Соискатель успешно преодолел указанные трудности и получил, используя продуманные численные алгоритмы, распределение и кинетику напряжений, деформаций и перемещений в полимерных стержнях с учетом возмущений. Там, где возможно, результаты сравниваются с решениями, полученными другими авторами ранее.

Достоверность результатов и выводов, сформулированных в диссертационной

работе, обеспечивается строгими математическими постановками рассматриваемых задач и обоснованном применении 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.

### **3. Практическое значение результатов работы**

Ценность полученных в диссертации результатов определяется, прежде всего, запросами практики, послужившими исходной точкой при проведении исследований. Пожалуй, главный позитивный результат диссертации справедливо сформулирован в одном из выводов: «Получено разрешающее уравнение для расчета на боковое выпучивание вязкоупругих балок постоянной и переменной жесткости с учетом начальных несовершенств в виде эксцентриситета приложения нагрузки, а также начальной погиби в плоскости наименьшей жесткости и начального угла закручивания».

Разработана методика и программное обеспечение для обработки кривых ползучести и релаксации на основе уравнения Максвелла-Гуревича. Предложены и обоснованы величины длительных модулей упругости и длительных коэффициентов Пуассона, длительной цилиндрической жесткости, позволяющие определить перемещения и напряжения в конце процесса ползучести с использованием известных методов решения упругих задач.

Разработанные методики, алгоритмы, программное обеспечение, могут быть внедрены в расчетную практику ряда научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций и использоваться на этапах проектирования.

#### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав. Общий объем работы составляет 321 страница, содержит 199 рисунков, 33 таблиц. Список литературы состоит из 248 наименований.

**Во введении** соискатель обосновывает актуальность проблемы и выбранного направления исследований, формулирует цель работы и сообщает основные положения.

**В первой главе** диссертантом проведен литературный обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных постановке и решению задач по выбранной тематике исследований. В разделе 1.1. приведен вполне подробный обзор теоретических и экспериментальных данных по продольному изгибу стержней с учетом ползучести. В разделе 1.2 соискатель приводит некоторые сведения о теориях вязкоупругости (ползучести), критерии и уравнение состояния Максвелла-Гуревича.

В разделах 1.2.3 и 1.2.4 приводится описание дискретного спектра времен

релаксации при одноосном и двухосном напряженном состоянии. В заключении главы соискатель приводит обзор исследований устойчивости стержневых систем, в том числе, плоской формы изгиба.

**Вторую главу** диссертант полностью посвящает вопросам устойчивости сжатых стержней с учетом ползучести при действии механических нагрузок.

В первых разделах решаются численно-аналитическим методом продольный изгиб призматических упругих стержней с учетом собственного веса переменной жесткости при действии осевой нагрузки. Решение предлагается искать в виде степенного ряда относительно прогиба. Приводится доказательство сходимости ряда и последовательность численно-аналитической реализации метода для модельных задач с различными схемами закрепления

Далее представлены выводы разрешающих уравнений для устойчивости стержней с учетом ползучести и методика решения поставленной задачи.

Заслуживает внимания раздел 2.5, где соискатель применяет классические методы для решения задачи такие как энергетический метод в форме Ритца-Тимошенко и метод Бубнова-Галеркина.

Задачи устойчивости при температурном воздействии автором решаются в несколько этапов. Решение происходит как для несвязанных задач в предположении, что скорость изменения параметров на каждом временном этапе настолько мала, что ей можно пренебречь, т.е. на каждом временном этапе решается квазистатическая задача.

Необходимо отметить, что автором не определялось точное распределение температурного поля, что собственного от него и требовалось.

В конце главы приводятся результаты решения задач с учетом дискретности спектра времен релаксации. Здесь диссертант отмечает преобладающую роль второй составляющей спектра времен релаксации и показывает, что в расчётах на устойчивость ее необходимо учитывать.

**В третьей главе** диссертантом рассматриваются вопросы изгибно-крутильной форма потери устойчивости вязкоупругих стержней переменной жесткости.

В разделе 3.1. приводится вывод дифференциального уравнения устойчивости плоской формы изгиба балки переменного сечения, учитывающее приложение нагрузки не в центре тяжести поперечного сечения (над или под центром тяжести) в упругой постановке. Приводится решение модельных задач энергетическим методом. Здесь представлено широкая линейка вариации типовых форм изменения жесткости для стержней с различными условиями закрепления концов. Во всех вариантах подбора функции прогиба автор рассматривает сходимость от количества членов ряда.

Для вязкоупругого стержня произвольного сечения получено дифференциальное уравнение относительно угла закручивания. Предложена методика решения, основанная на применении метода конечных разностей и метода конечных элементов.

В **Главе 4** рассматривается устойчивость стержней и арок с учетом вязкоупругопластических свойств материала (дерево, бетон). В качестве закона, устанавливающего связь между напряжениями и деформациями, было использовано уравнение вязкоупругопластической модели наследственного старения предложенное проф. А.Г. Тамразяном. В качестве соотношения, устанавливающего связь между напряжениями и мгновенными деформациями для сжатой древесины, использовалась формула Ф.И. Герстнера.

В разделе 4.2. рассматриваются решения задачи расчета на устойчивость деревянных арок с учетом геометрической нелинейности методом конечных элементов. Осевая деформация при учете геометрической нелинейности представляет сумму линейной и нелинейной составляющей.

Решение физически и геометрически нелинейной задачи осуществляется при помощи метода Ньютона Рафсона. Расчет на ползучесть выполняется аналогично расчету на статическую нагрузку. Приращение деформаций ползучести в момент времени  $t + \Delta t$  соискателем определяется с использованием линейной аппроксимации по Эйлера и как показал расчет с учетом ползучести для данной арки, что даже при нагрузках, достаточно близких к мгновенной критической, рост перемещений носит ограниченный характер.

В разделе 4.3. моделируется равновесие железобетонных арок при ползучести и ее конечно-элементная реализация. Рассматривается арка параболического очертания, шарнирно опёртую по концам.

Из приведенных автором графиков видно, что пренебрежение как геометрической нелинейностью, так и нелинейной составляющей ползучести приводит к существенному расхождению между результатами.

**Глава 5** посвящена устойчивости тонких изотропных пластин с учетом физической и геометрической нелинейности.

Соискатель ставит задачу получения разрешающих уравнений для задачи изгиба и устойчивости гибкой пластинки, а также устойчивости нелинейно вязкоупругих прямоугольных пластин, находящихся под действием усилий в срединной плоскости, с учетом геометрической нелинейности. В начале приводится решение для круглых пластин относительно двух функций: функции прогиба и функции напряжения. Результаты, полученные двумя методами, достаточно хорошо согласуются между собой.

Далее в разделе 5.6 получены разрешающие уравнения для задачи устойчивости нелинейно вязкоупругих прямоугольных пластин, находящихся под действием усилий в срединной плоскости, с учетом геометрической нелинейности. В качестве граничных условий по функции напряжений автор использует рамную аналогию.

В заключении приведено решение модельной задачи о влиянии отверстий на выпучивание прямоугольных пластин при ползучести.

В **шестой главе** в начале показана методика определения реологических параметров полимерных материалов по кривым сдвиговой ползучести и с использованием методов нелинейной оптимизации. Здесь предлагается методика, в которой в качестве исходных данных могут быть использованы результаты испытаний на любой из простейших видов деформации (сдвиг, изгиб).

В разделе 6.4 представлено испытание по определению зависимости критического времени от нагрузки и соответственно сравнение с теоретическим результатом. При испытаниях в режиме ползучести были получены зависимости прогиба середины стержня от времени для разных нагрузок. Несмотря на известный разброс экспериментальные точки располагаются довольно плотно вблизи некоторой кривой, что свидетельствует об определенной функциональной зависимости между критическим временем и сжимающей силой.

Осреднение экспериментальных результатов (по близким значениям нагрузки) дает экспериментальную кривую, с которой удовлетворительно совпадает теоретическая кривая, отвечающая среднему значению параметра начальной релаксационной вязкости.

#### **4. Достаточность и полнота публикаций по теме диссертации**

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 54 печатных работах, из них 23 работы в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ, 31 статья в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Web of Science и Scopus, 4 монографии. Получены 4 авторских свидетельства на программы для ЭВМ, 1 патент.

#### **5. Замечания по работе:**

1. В ряде задач, представленных в диссертации, при решении автор использует конкретные числовые данные. Желательно по возможности приводить решение к безразмерному виду, чтобы результаты были справедливы для различных входных данных.

2. В диссертации приведено много графиков распределения прогиба и напряжений в процессе ползучести. Но, к сожалению, нет графика зависимости полной деформаций от времени. А если еще разбить полную деформацию на

составляющие и показать их распределение, то процесс устойчивости при ползучести был бы более наглядным.

3. Некоторые объемные графики, на мой взгляд, являются не очень информативными. Стоило их продублировать плоскими графиками для характерных сечений.

4. Относительно критерия «потери устойчивости» при ползучести, который использует автор, можно заметить, что нельзя однозначно считать критериальной величиной стрелу прогиба стержня. Во многих случаях зависимость ее от времени такова, что наступает момент, когда стрела прогиба начинает быстро расти, и, может быть, более логично было бы принимать за критерий «потери устойчивости» **скорость** роста прогибов.

5. В диссертации приведена достаточно интересная задача выпучивания стержня при нагреве, однако ее решение выполняется с допущением, что, нагрев происходит мгновенно и затем температура остается постоянной. Следовало рассмотреть случай, когда, нагрев происходит не мгновенно, а за определенное время.

6. В случае действия на арку несимметричной нагрузки автор не учитывает работу растянутого бетона, обнуляя в точках с растягивающими напряжениями секущий модуль.

7. Насколько термодинамически обоснованной является предложенная в работе модель термовязкоупругости?

8. Нет ссылок на работы Новожилова В.В., Донелла Л.Г., Шклярчука Ф.Н., Паймушина В.Н., Шалашилина В.И., в которых проведен анализ различных вариантов приближенных соотношений теории деформаций, известных как полный и неполный варианты квадратичного приближения нелинейной теории, в которых показано, что из них соотношения полного варианта, определяющие деформации удлинений, и соотношения неполного варианта, определяющие сдвиговые деформации, являются некорректными, т.к. при решении конкретных задач приводят к появлению ложных точек бифуркаций. Насколько корректными являются полученные в работе соотношения нелинейной теории?

9. В четвертой главе исследуется «устойчивость стержней и арок с учетом вязкоупругопластических свойств материала», но параметры, определяющие пластическое деформирование, в работе несколько завуалированы. Желательно, определить их более подробно.

Указанные замечания не являются принципиальными и никак не влияют на общее положительное впечатление о диссертации.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертации.



### Общее заключение

Резюмируя сказанное, считаю, что в диссертации С.Б. Языева есть интересное сочетание важнейших составляющих научного исследования, направленного, в конечном счете, на решение технических задач - корректная и полная постановка теоретической проблемы, аналитическое и численное решения поставленной задачи.

И, поскольку, все элементы вышеуказанных составляющих в рецензируемой работе выполнены на должном научном уровне, считаю, что диссертация является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований *решена крупная научная проблема* совершенствования нелинейного реологического расчета стержней и пластин на устойчивость при термосиловых воздействиях, *имеющая важное хозяйственное значение*, что соответствует требованиям п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в действующей редакции), а ее автор, Языев Сердар Батырович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика

**Официальный оппонент**, д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической механики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»



Д.В. БЕРЕЖНОЙ

Сведения об официальном оппоненте:

Бережной Дмитрий Валерьевич, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, Кремлевская, 18, профессор кафедры теоретической механики, д.ф.-м.н., доцент, тел.: +7(843)237-76- 83, адрес электронной почты: berezhnoi.dmitri@mail.ru

Бережной Д.В.  
ВЕДУЩИЙ ДОКУМЕНТОВЕ,  
21.02.2023

