

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Яковлева Игоря Александровича на тему «Моделирование НДС механических систем с нелинейными свойствами в сложных условиях нагружения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация И. А. Яковлева «Моделирование НДС механических систем с нелинейными свойствами в сложных условиях нагружения» посвящена развитию методов численного решения сопряженных задач термомеханики для прогнозирования механического поведения твердых тел с нелинейными свойствами под воздействием высокотемпературных газов или жидкостей. Развитие перспективных направлений энергетической и нефтегазовой машиностроительной отрасли все больше связано с обеспечением критических условий протекания процессов с достижением высоких рабочих температур и давлений. В этой связи является востребованным создание универсальных методик компьютерного моделирования НДС для прогнозирования прочности, работоспособности, долговечности ответственных узлов и элементов конструкций в сложных неизотермических условиях нагружения при воздействии жидких или газообразных сред с локальными источниками тепла.

Тематика исследований диссертационной работы И. А. Яковлева, связанная с развитием методов численного моделирования НДС твердых тел сложной конфигурации с нелинейными свойствами в условиях теплового и механического воздействия со стороны высокотемпературных газообразных или жидких сред для получения прогнозов прочности, работоспособности и долговечности ответственных элементов конструкций является, несомненно, актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения, изложенных на 132 страницах машинописного текста, список литературы из 172 наименования.

Во введении изложена актуальность диссертационного исследования, указаны цели, основные задачи работы, ее новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы полученные новые научные результаты, приведены сведения об апробации работы.

В первом разделе приведен краткий обзор основных методов описания НДС твердых тел в неизотермических условиях нагружения. Особое внимание уделяется проблемам численного решения сопряженных задач термомеханики. Предложен универсальный подход к моделированию процессов деформирования твердых тел в сложных неизотермических условиях нагружения при воздействии жидких или газообразных сред с локальными источниками тепла. Подход основан на идее интеграции в рамках единой вычислительной модели идейно близких численных методов решения краевых задач механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа со специальным алгоритмом сопряжения.

Во втором разделе изложена постановка задачи описания НДС твердых тел в условиях термомеханического воздействия активных газообразных или жидких сред с учетом возможности возникновения необратимых деформаций. Обсуждаются проблемы построения определяющих соотношений и выражений, устанавливающих зависимость скорости деформации ползучести в неизотермических условиях нагружения в широких диапазонах изменения температуры материалов.

В третьем разделе изложен итерационный вычислительный алгоритм решения сопряженных задач термомеханики для описания процессов эволюции теплового и напряженно-деформированного состояния сложных механических систем с учетом нелинейного поведения материалов и зависимости их физико-механических свойств от температуры, основанный на численных методах конечных элементов и конечных объемов со специальными процедурами сопряжения.

Четвертый раздел работы посвящен результатам решения тестовых и модельных задач для оценки сходимости построенных алгоритмов, а также точности и корректности результатов решения сопряженных задач термомеханики. Рассмотрен ряд задач термомеханического нагружения полого цилиндра и релаксационных процессов в балке, происходящих при фиксированном растяжении (задача релаксации напряжений) и под действием заданного напряжения (деформация ползучести). Показано, что использование разработанных моделей и методик приводит к корректным результатам



моделирования, не противоречащим современным положениям механики деформируемого твердого тела. Результаты численного решения согласуются с имеющимися в литературе данными физических экспериментов и известными аналитическими решениями. Расхождение результатов составляет не более 5,5 %.

В пятом разделе содержатся результаты моделирования процессов эволюции теплового и напряженно-деформированного состояния механических систем в сфере энергетического и нефтегазового машиностроения, когда формируются сложные неизотермические условия нагружения. Рассмотрены сопряженные задачи тепломассопереноса в реакторе фильтрационного горения газов. Сопоставление результатов расчетов с данными других авторов показало, что расхождение в прогнозах критических значений НДС может достигать 70%. Преимуществом предложенного подхода является явный учет локальных изменений температуры твердого тела, обусловленной неизотермическими турбулентными потоками газа. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с аналитическими оценками методами теплотехники.

Приведены результаты численного исследования термомеханических процессов в типовых элементах конструкций реакторов фильтрационного горения. Показано, что применение футеровочного слоя термостойкого бетона в качестве тепловой защиты реакционной зоны позволяет предотвратить развитие недопустимых деформаций в элементах конструкций в условиях достижения температур сгорания топлива в 1500 °С.

Проведено численное исследование процессов эволюции теплового и напряженно-деформированного состояния формирующегося в типовых элементах конструкций трубопроводных систем в результате воздействия высокотемпературных турбулентных газовых потоков. Установлены закономерности формирования НДС и очагов деформаций пластичности и ползучести в твердых телах в процессе их прогрева высокотемпературным газом от температуры окружающей среды до 750 °С. Установлена динамика развития НДС системы в зависимости от скорости изменения теплового состояния и расхода транспортируемых сред.

В заключении диссертации сформулированы результаты работы и основные выводы по проведенному исследованию.

Научная новизна рассматриваемой диссертационной работы заключается в развитии подхода численного моделирования сопряженных термомеханических процессов в механических системах, где твердые тела с нелинейными свойствами подвергаются воздействию неизотермических потоков газов или жидкостей со сложной структурой и физикой течения. Разработан итерационный вычислительный алгоритм численного решения нестационарных сопряженных задач термомеханики. С использованием разработанной методики были проведены численные исследования, в результате которых были расширены представления о закономерностях эволюции теплового и напряженно-деформированного состояния типовых элементов конструкций энергетических устройств в сложных неизотермических условиях нагружения.

Практическая значимость диссертации заключается в возможности применения разработанных методик и моделей при решении задач прогнозирования параметров прочности, работоспособности и долговечности ответственных деталей, узлов и элементов конструкций в области энергетического и нефтегазового машиностроения, в процессе эксплуатации которых возникает значительный разогрев в результате воздействия высокотемпературных рабочих сред со сложной структурой и физикой течения. Учет связанности процессов деформации и тепломассопереноса в явном виде позволяет исследовать связи между характером внешних воздействий со стороны газообразных или жидких сред и деформационным поведением элементов конструкций, что позволяет эффективно определять оптимальные и рациональные режимы работы различных устройств без риска возникновения недопустимых деформаций и разрушения.

Обоснованность и достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается математической корректностью постановок задач и подтверждается сравнением результатов численного моделирования с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными других авторов.



Результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях и известны специалистам.

Содержание автореферата правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация не лишена недостатков:

1. В подразделе 2.3 на стр. 28 правомерно указывается, что в процессе эксплуатации промышленных устройств, обеспечивающих стабильность термомеханических процессов при различных режимах эксплуатации, изменение теплового состояния происходит медленно, поэтому инерционными эффектами можно пренебречь. При этом рассматривается квазистационарная постановка с уравнением равновесия (29), которое решается методом последовательных приближений, но при этом используются граничные условия на межфазной поверхности (48), зависящие явным образом от времени. Необходимо, наверное, было указать на существенные ограничения данного подхода: медленного изменения по времени и достаточной гладкости.

2. В этом же уравнение (48) в правой части опущены компоненты нормали, так как справа должен быть вектор,  $\sigma_{ij}(\mathbf{x}, t)n_j = -p_{f-s}(\mathbf{x}, t)n_i$ .

3. При постановке задачи исследования закономерностей эволюции НДС в типовых элементах конструкций трубопроводных систем (раздел 5.2) явно не указано, какая модель упругопластического материала была использована.

4. Следовало бы отметить какие параметры, входящие в соотношения для скорости деформации ползучести (формулы (43), (65)) являются эмпирическими, а также указать с использованием каких экспериментальных методик данные параметры могут быть определены для конкретных конструкционных материалов, применяемых в нефтегазовом и энергетическом машиностроении.

5. Следовало бы более подробно остановиться на проблеме выбора временного шага интегрирования. Было бы полезным привести рекомендации по

выбору величины шага временной дискретизации, которая позволяет получать сходящееся численное решение при описании процессов ползучести в условиях интенсивного разогрева.

Замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы в целом.

Диссертация представляет законченную научную квалификационную работу, в которой решена задача, имеющая важное значение для исследований, связанных с постановкой и решением краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических и тепловых воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники, а также для исследований, направленных на разработку и развитие математических моделей и численных методов анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования, что соответствует пунктам 7 и 8 паспорта специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Результаты диссертации И.А. Яковлева имеют существенное значение для специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Таким образом, диссертационная работа «Моделирование НДС механических систем с нелинейными свойствами в сложных условиях нагружения» по содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения научных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. N 842, к кандидатским диссертациям (п. 9), а ее автор, Яковлев Игорь Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент  
кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник  
лаборатории физических основ прочности  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт механики сплошных сред

Уральского отделения  
Российской академии наук  
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1,  
рабочий телефон: 8-(342)-237-84-61  
E-mail: buv@icmm.ru  
www.icmm.ru  
« 1 » декабря 2015 г.

Баяндин Юрий Витальевич

Я, Баяндин Юрий Витальевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Яковлева Игоря Александровича, и их дальнейшей обработкой.

Подпись кандидата физико-математических наук,  
научного сотрудника Ю.В. Баяндина подтверждаю

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН



Н.А. Юрлова