

**Информация о ходе выполнения работ, выполняемых  
по Соглашению № 14.574.21.0118 от 24 ноября 2014 г. о предоставлении субсидии в  
рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по  
приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России  
на 2014-2020 годы"**

**1 Этап «Выбор направления исследований»**

1) Проведен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ. По результатам обзора можно отметить значительный интерес многих исследователей и их большую активность в области разработки методов и алгоритмов конечноэлементного моделирования нелинейного деформирования тел с учетом процессов термоупругости и упругопластичности и недостаточности имеющегося на сегодняшний день арсенала программных средств для решения важнейших практических задач, в том числе при проектировании современной авиационной и космической техники. Это подтверждает актуальность создания соответствующего ПО, удобного в использовании и эффективного при решении этого важного для технологического развития авиакосмической отрасли класса задач.

2) Проведены патентные исследования. Аналитическая часть и отчет о поиске представлены в отчете о патентных исследованиях. В целом же, результаты патентных исследований показали, что проведение ПНИ актуально, а предлагаемые к разработке программно-технические решения обладают патентной чистотой и определенными техническими преимуществами при решении рассматриваемого класса задач.

3) Обоснован вариант алгоритма решения задачи моделирования, включающий следующие отличительные особенности предлагаемого к разработке ЭО ПО:

а) использование каркасных сеток (с возможностями их стыковки) для задания произвольных конструкций, что, во-первых, позволит сделать достаточно быстрым и максимально автоматизированным процесс построения расчетной сетки, а во-вторых, обеспечит достаточно простую возможность локальных дроблений в местах образования и развития повреждений;

б) использование расширяемой библиотеки макрообъектов – некоторых стандартных элементов конструкции, параметризованных в терминах предметной

области, что позволит упростить работу конструктора и повысить вычислительную эффективность при решении специализированных классов задач;

в) использование при построении конечноэлементных аппроксимаций базисных функций, построенных по иерархическому принципу, что обеспечит достаточно простую возможность локального повышения порядка элементов для уточнения решения, в том числе в местах образования и развития повреждений;

г) использование поэтапного изменения конечноэлементной сетки с перемещением ее узлов в соответствии с найденными на текущем шаге смещениями и сохранением ее структуры и "предыстории" деформаций каждого конечного элемента обеспечит адекватное моделирование нелинейных (в том числе упругопластичных) процессов деформирования при больших нагрузках.

4) Обоснованы и разработаны цели моделирования.

5) Разработаны математические модели для расчета процесса нагружения тела, включая построение вариационных постановок и конечноэлементных аппроксимаций, в соответствии с обоснованным вариантом алгоритма решения задачи. Подробное описание математических моделей, соответствующих вариационных постановок и конечноэлементных аппроксимаций представлено в разделе 5. Разработанные математические модели в сочетании с возможностью изменения конечноэлементной сетки в процессе моделирования с сохранением структуры сетки и "предыстории" деформаций каждого конечного элемента, а также с возможностью локального повышения порядка за счет  $h$ -технологии (разработаны КЭ-аппроксимации на несогласованных сетках),  $p$ -технологии (разработаны КЭ-аппроксимации с использованием иерархических базисных функций на элементах различных типов, включая криволинейные элементы, в том числе для ситуаций, когда в сетке граничат элементы различных порядков),  $p$ - $h$ -технологии (разработаны КЭ-аппроксимации для ситуации согласования элементов различных порядков на несогласованных сетках) обеспечат адекватность моделирования при больших нагрузках и нелинейных деформациях, а также точность моделирования при образовании и развитии повреждений.

Разработанные на данном этапе математические модели доведены до вычислительных схем и подготовлены к программной реализации на последующих этапах ПНИ.