

**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"**

5 Этап «Обобщение и оценка результатов исследований»

1) На основании теоретических и экспериментальных исследований ЭО ПО, а также его апробации на задачах, лежащих в сфере интересов Индустриального партнера, выполнено обобщение результатов ПНИ. В отчете о НИР отражены основные технические характеристики созданного экспериментального образца промышленного программного обеспечения для моделирования поведения элементов конструкций из современных материалов в экстремальных условиях при механических и немеханических воздействиях и ориентированного на решение задач проектирования авиакосмической техники.

Получены новые программно-технические решения в части

а) вычислительно эффективных алгоритмов построения конечноэлементных сеток высокого качества с возможностью локальных дроблений в окрестности концентраторов напряжений;

б) моделирования термоупругого состояния 3D конструкций с коническими и цилиндрическими поверхностями, изготовленных из многослойных композитов, без использования гомогенизации, с возможностями учета излучения, геометрической и физической нелинейности, автоматического построения расчетных сеток, расчета или задания теплового потока, учета различных типов тепловых и механических контактов между конструктивными элементами;

в) построения конечноэлементных аппроксимаций на несогласованных конечноэлементных сетках с терминальными узлами;

г) построения конечноэлементных аппроксимаций с использованием криволинейных конечных элементов различного порядка, построенных по иерархическому принципу с реализацией возможности локального повышения порядка элементов в окрестности концентраторов напряжений.

2) Проведены дополнительные патентные исследования, целью которых было обоснование патентной чистоты разработанного программного модуля генерации

конечноэлементных систем линейных алгебраических уравнений, предназначенного для расчета напряженно-деформированного состояния. Показано, что разработанный модуль, обеспечивающий

а) возможность моделирования напряженно-деформированного состояния элементов трехмерных конструкций при конечных деформациях, вызываемых как механическими, так и немеханическими (тепловыми) воздействиями;

б) возможность использования трехмерных конечных элементов высоких порядков с иерархическими базисными функциями;

в) возможность локального повышения порядка элементов;

г) возможность использования конечных элементов с терминальными узлами;

д) учет анизотропных свойств материала;

е) учет нелинейности задачи как геометрической, так и при зависимости коэффициентов задачи от решения

обладает патентной чистотой.

3) Проведено сопоставление результатов анализа научно-информационных источников и результатов теоретических и экспериментальных исследований. В рамках этого проведены дополнительные исследования, позволяющие расширить представление о преимуществах и недостатках реализованных в ЭО ПО различных способов аппроксимации при моделировании динамических процессов. Показаны преимущества реализованных в ЭО ПО программно-технических решений в сравнении с решениями, предлагаемыми в передовых наиболее известных конечноэлементных пакетах и представленными в научно-информационных источниках, в части совершенствование аппарата метода конечных элементов для решения различных задач прочности и задач моделирования процессов термоупругого и упругопластического деформирования конструктивных элементов авиационной техники.

4) На основе результатов экспериментальных исследований ЭО ПО и результатов его апробации на задачах Индустриального партнера разработаны рекомендации по использованию результатов ПНИ в части применения созданного ЭО ПО для решения задач проектирования элементов конструкций авиационной техники и его дальнейшего развития.

5) Также на основе результатов экспериментальных исследований ЭО ПО, результатов его апробации на задачах Индустриального партнера и рекомендаций по дальнейшему развитию возможностей ЭО ПО разработан проект ТЗ на ОКР.

6) Проведена дополнительная апробация ЭО ПО на задачах Индустриального партнера. В том числе представлены возможности разработанного программного обеспечения для решения трехмерных связанных задач – задач термоупругости на примере моделирования термоупругого состояния остекления кабины пилота перспективного сверхзвукового самолета. Показаны преимущества разработанного в ЭО ПО генератора конечноэлементных сеток перед используемым в программном комплексе ANSYS. Показаны возможности ЭО ПО при расчете обтекателей гиперзвуковых летательных аппаратов из композиционных материалов при неосесимметричном нагреве и охлаждении и нагрузках типового полета, включая возможности пре- и постпроцессинга. Показаны возможности ЭО ПО при решении задач численного нелинейного анализа напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций. Представлена окончательная верификация предложенного алгоритма моделирования напряженно-деформированного состояния с учетом пластичности на задаче упругопластического деформирования полого шара, имеющей аналитическое решение, и апробация алгоритма на задаче упругопластического деформирования тонкостенной панели при нагружении и последующей разгрузке.