

**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"**

3 Этап «Теоретические исследования поставленных перед ПНИ задач. (2 очередь)»

1) Разработана и реализована расширяемая библиотека макрообъектов и инструментальные средства работы с ней. Разработанные и реализованные на сегодняшний день составляющие библиотеки и соответствующие инструментальные средства позволяют конструктору работать с относительно небольшим набором параметров, характеризующих конструкцию элементов летательного аппарата и свойства материалов их компонент, что достаточно удобно для инженерного анализа. С другой стороны, расчеты термоупругого состояния проводятся с использованием трехмерных математических моделей с учетом геометрической и физической нелинейностей и с возможностью задания многослойных композитных материалов с поворачивающимися осями анизотропии в отдельных слоях этих композитов, что позволяет выполнять моделирование сложных объектов из современных и перспективных материалов с очень высокой степенью адекватности.

При создании библиотеки предложены и реализованы новые технологические решения в части вычислительно эффективных алгоритмов расчета аэродинамического теплового потока для сложных режимов полета гиперзвуковых летательных аппаратов (которые во многих случаях позволяют без потери адекватности заменить крайне вычислительно затратное газодинамическое моделирование), а также в части решения трехмерных связанных задач прочности. Предложенные решения позволяют выполнять моделирование термоупругого состояния 3D конструкций с коническими и цилиндрическими поверхностями, изготовленных с использованием современных композитных материалов, без использования гомогенизации, т.е. путем прямого включения в компьютерную модель тонких слоев ламината с различным направлением армирующих волокон и, если требуется, различных типов материалов. Это, в свою очередь, позволяет детально (в слоях) изучать распределение напряжений вдоль и поперек армирующих волокон при механических и термальных нагрузках, определять появление в отдельных слоях недопустимых напряжений и на основе этого оптимизировать конфигурацию композитного ламината: тип материала, количество, ориентацию и последовательность укладки слоев. Кроме того, предложен подход к постобработке конечноэлементных решений, который позволяет изучать наряду с главными

напряжениями также и напряжения в локальной системе координат, ориентированной в каждой точке ламината вдоль осей анизотропии, в том числе с учетом их возможного поворота внутри одного слоя на конической поверхности элемента конструкции.

Разработанные элементы библиотеки и вызываемые из них расчетные модули для решения связанной термомеханической задачи зарегистрированы в виде программы для ЭВМ «NoCa» (свидетельство о государственной регистрации № 2015660157 от 23.09.2015), предназначенной для моделирования термоупругого состояния при аэродинамическом нагреве носовых обтекателей гиперзвуковых летательных аппаратов, и «MeNoCa» (свидетельство о государственной регистрации № 2015661962 от 13.11.2015), предназначенной для автоматической генерации сеток в конструкциях конусообразных обтекателей летательных аппаратов.

Проведен анализ адекватности результатов моделирования, получаемых с использованием предложенных технологических решений, при решении связанных (термомеханических) задач на примере решения задачи моделирования термоупругого состояния носовых обтекателей гиперзвуковых летательных аппаратов, изготовленных из различных материалов, в условиях различных, изменяющихся во времени, высоких тепловых и механических воздействий. Сравнение проводилось с экспериментальными и расчетными результатами, опубликованными в высокорейтинговом зарубежном журнале *International Journal of Thermal Sciences*, а также в публикациях, в которых представлены результаты, полученные по программе испытаний гиперзвуковых летательных аппаратов HIFiRE. Полученные результаты подтвердили адекватность предложенных подходов и решений.

Разработанные технологические решения, результаты их верификации и примеры возможностей их использования для проектирования и оптимизации носовых обтекателей гиперзвуковых летальных аппаратов представлены в оформленных по результатам выполненных исследований статьях.

2) Выполнена программная реализация разработанных на предыдущем этапе выполнения НИР алгоритмов для различных типов элементов высокого порядка.

3) Разработана общая архитектура ЭО ПО и описана функциональность основных его модулей. Выполнена программная реализация всех модулей ЭО ПО.

4) С учетом разработанной архитектуры ЭО ПО на его программную реализацию разработана программная документация, представленная в виде отдельных документов.

5) Разработана программа и методики проведения экспериментальных исследований с учетом специфики решаемых создаваемым ЭО ПО задач прочности, включая связанные задачи прочности с возможностью учета радиационного излучения тепла, геометрической и физической нелинейности с использованием конечных элементов различных порядков и технологий локального дробления сетки и/или локального повышения порядка элементов для уменьшения погрешности численного решения с минимальным ростом вычислительных затрат.

Проведенные к настоящему времени расчеты актуальных для Индустриального партнера задач (в том числе за счет внебюджетных средств), результаты которых представлены в отчетах о НИР за предыдущий и текущий этапы, а также в оформленных по результатам выполненных исследований статей подтверждают работоспособность и корректность реализации основных алгоритмов ЭО ПО и взаимодействия его компонент. Детальные же экспериментальные исследования всех возможностей разработанного ЭО ПО (в том числе с использованием элементов высоких порядков) на основе разработанной ПМЭИ будут проведены на следующем этапе НИР.