

# Внедрение имитационного моделирования аэрогазогидродинамики и теплообмена – перспективное направление в проектировании РКТ

Развитие ракетно-космической техники (РКТ) в значительной степени стимулировало прогресс в области вычислительной техники и математического моделирования процессов аэрогазогидродинамики и теплообмена, что позволяет разрабатывать все более детальные и адекватные имитационные модели. Имитационное моделирование как метод исследования является частью математического моделирования, при котором изучаемая система заменяется численной компьютерной моделью, описывающей реальную систему с необходимой для целей исследования точностью. В рамках этой модели с помощью изменения входных параметров, начальных и граничных условий возможно проведение вычислительных экспериментов - так называемая имитация работы системы, позволяющая изучать поведение и характеристики моделируемой системы. Имитационные модели дают возможность для выполнения проектных разработок в сжатые сроки, существенного сокращения объемов и времени проведения наземной экспериментальной отработки за счет проведения вычислительных экспериментов, проведения оптимизации компоновок путем расчетов нескольких вариантов, подробного исследования физических процессов при расчете течений вне и внутри сложных компоновок.

В области аэрогазогидродинамики и теплообмена математические и имитационные модели строятся на основе программных средств, реализующих решение уравнений Навье-Стокса для движения сплошной среды (CFD-пакеты) или использующих прямое статистическое моделирование для решения уравнений Больцмана при движении в разреженной среде. Программное обеспечение такого типа для создания математических имитационных моделей аэрогазогидродинамики и теплообмена изделий РКТ начало внедряться на ОАО "ГРЦ Макеева" с начала 90-х годов прошлого века. В настоящее время предприятие располагает широким набором программных комплексов, среди которых имеются как популярные универсальные пакеты, так и узкоспециализированные программы.

Вычислительные мощности, которыми в настоящее время располагает ОАО "ГРЦ Макеева", обладают производительностью до 3 ТФлопс. По современным меркам этот показатель является довольно скромным, тем не менее имеющаяся вычислительная производительность позволяет решать широкий спектр задач. Перечень основ-

ных задач ОАО "ГРЦ Макеева", решаемых с помощью имитационных моделей, выглядит таким образом:

1. **Газодинамика ракетного старта:** подводного, наземного, шахтного, с самолета-носителя.
2. **Полет ракеты-носителя (РН) по траектории:** определение интегральных и распределенных аэродинамических характеристик (АДХ) с учетом струй двигателей, расчет тепловых и газодинамических нагрузок при разделении двигателей ступеней ракеты, воздействия при срабатывании пиросредств, отделение частей ракеты и их падение, воздействие струй в вакууме, аэродинамическое и струйное тепловое воздействие, модель собственной внешней атмосферы, воздействие ударной волны удаленного взрыва.
3. **Аэродинамика и тепловые режимы спускаемых гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА):** АДХ ГЛА, тепловые режимы ГЛА вне атмосферы, тепловые режимы ГЛА с учетом абляции теплозащитного покрытия, температурные режимы в донной области, сопряженный аэротермодинамический расчет траектории и тепловых режимов спускаемых ГЛА с перестройкой геометрии в процессе счета.
4. **Наземная эксплуатация РН:** тепловлажностные режимы РН при транспортировке и на стартовом комплексе, внутренние течения в отсеках при термостатировании в процессе подготовки, долговременное хранение, старение материалов.

Имитационное моделирование с использованием современных программных продуктов позволяет решать изложенные выше задачи, не прибегая к использованию эмпирической информации и существенных упрощений. Ниже рассмотрены примеры некоторых задач, решаемых в настоящее время в ОАО "ГРЦ Макеева" в части аэрогазогидродинамики и теплообмена. Для всех задач имеются математические имитационные модели, позволяющие получить с проектной точностью не только интегральные и распределенные характеристики взаимодействия с внешней средой, но и, как уже было сказано, предоставляющие возможность исследовать физические процессы вне и внутри сложных компоновок, а также провести при необходимости оптимизацию конструкции и режимов работы систем.

При наземном старте (рис. 1) на ракету-носитель действуют ударно-волновые нагрузки от струй двигателей, распространяющихся по газоходу (рис. 2). Трехмер-

ный расчет с помощью математической имитационной модели позволяет проанализировать структуру потока и выдать рекомендации по улучшению конфигурации газохода с целью снижения возникающих стартовых нагрузок. В случае воздушного старта РН из транспортного самолета (рис. 3) необходимо определять воздействие потоков от движущейся ракеты на корпус носителя.

С помощью CFD-пакетов определялись АДХ ракеты в полете на атмосферном участке полета (рис. 4). Инженерные методики позволяют быстро оценить АДХ тел простой формы, а для комплексных тел только трехмерное моделирование обтекания полной геометрической модели позволяет получить искомые харак-

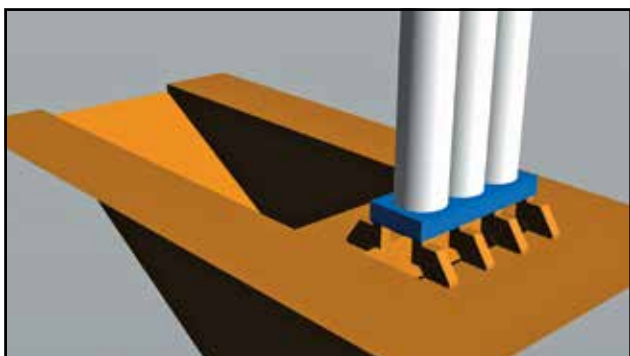


Рис. 1. Геометрическая модель РН на стартовом столе

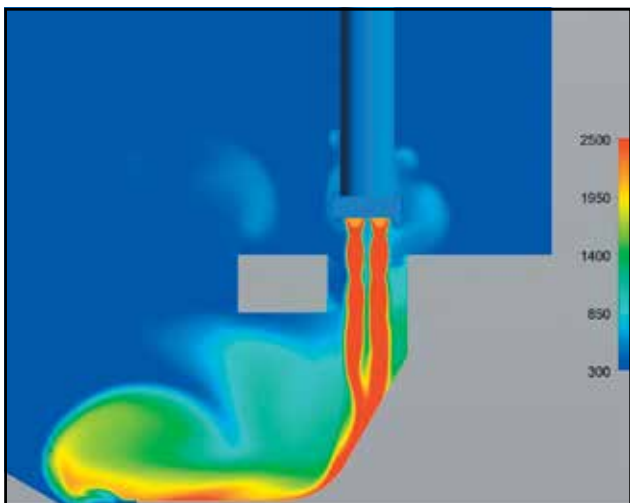


Рис. 2. Мгновенная картина распределения температуры в плоскости симметрии газохода после пуска двигателей

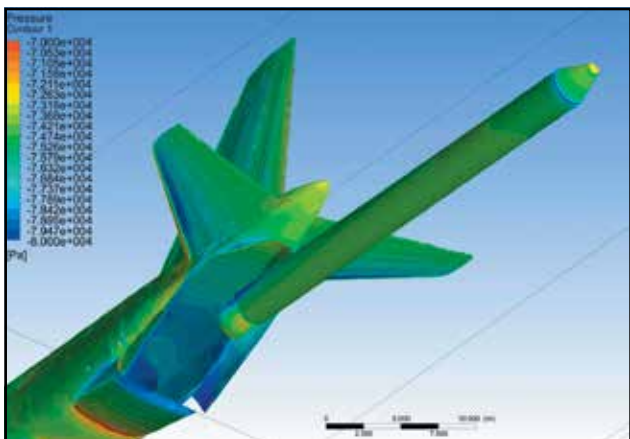


Рис. 3. Мгновенная картина распределения давления по поверхностям самолета и ракеты при ее выходе из фюзеляжа

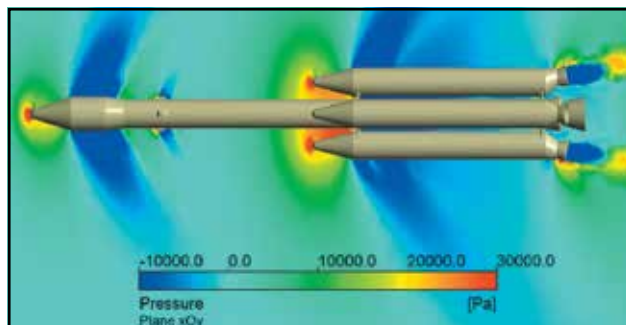


Рис. 4. Картина распределения давления в потоке на плоскости симметрии ракеты в полете

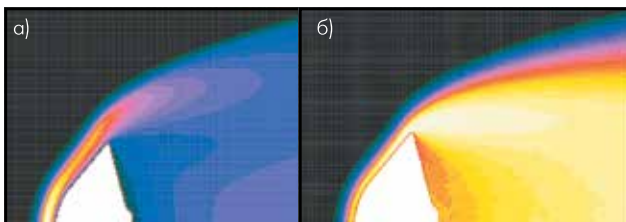


Рис. 5. Картина распределения температуры (а) и концентрации окиси азота (б) в потоке на плоскости симметрии для аппарата типа OREX при скорости 7,5 км/с

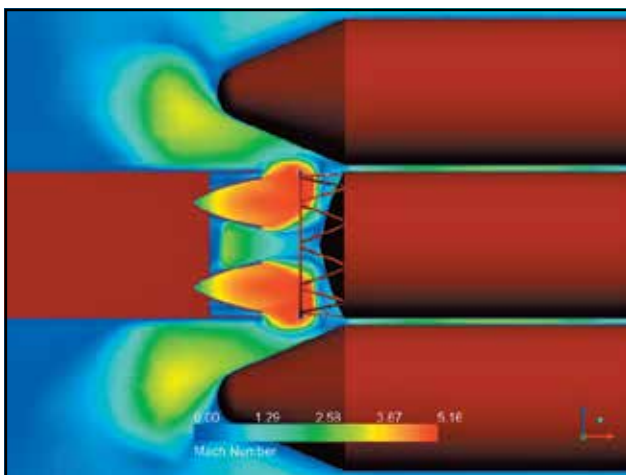


Рис. 6. Мгновенная картина распределения числа Маха после "горячего" разделения ступеней

теристики с удовлетворительной точностью. В случае полета аппаратов на больших высотах (рис. 5) используются подходы для расчета разреженной среды, основанные на прямом статистическом моделировании с помощью метода Монте-Карло.

В последнем примере (рис. 6), демонстрирующем преимущества применения имитационного моделирования в области проектирования РКТ, приведен расчет нагрузок при "горячем" разделении двигателей ступеней РН.

Проблемы внедрения имитационного моделирования в практику проектирования РКТ связаны прежде всего с экспоненциальным ростом требований к ресурсам вычислительных систем при увеличении детализации имитационных моделей. В этой связи перед ОАО "ГРЦ Макеева" стоит задача приобретения и модернизации или замены дорогостоящих суперкомпьютерных систем, а также подготовки и обучения специалистов.

Ю. В. Грахов, А. В. Приданников, В. И. Хлыбов,  
ОАО "ГРЦ Макеева"