

# Численное моделирование ударно-волновых воздействий на возвращаемый аппарат при срабатывании системы аварийного спасения

В период бурного развития вычислительной техники и программных комплексов численного моделирования возникает уникальная возможность широкого применения данных средств для разработки современных технических устройств, в частности пилотируемых возвращаемых аппаратов однократного или многократного использования, удовлетворяющих повышенным требованиям к надежности и безопасности эксплуатации.

При старте и полете ракеты с пилотируемым транспортным кораблем (ПТК) возможно срабатывание системы аварийного спасения (САС). В процессе запуска двигательных установок (ДУ) САС в соплах ДУ формируются ударные волны, которые, распространяясь, достигают поверхности возвращаемого аппарата (ВА) ПТК, расположенного ниже ракетного блока САС (рис. 1) и оказывают импульсное силовое воздействие на его конструкцию.

Целью совместного исследования, осуществленного специалистами компании "ТЕСИС" и ОАО "РКК "Энергия", являлось численное моделирование средствами программного комплекса FlowVision нестационарных газодинамических (ударно-волновых) воздействий на возвращаемый аппарат от запуска двигательных уста-

новок основного ракетного двигателя (ОРД) и ракетного двигателя экстренного отделения (РДЭО) системы аварийного спасения на стартовом участке полета ракеты космического назначения (РКН) с ПТК (число Маха полета  $M_\infty \approx 0$ ) и на участке выведения ПТК ( $M_\infty \sim 1,5$ ).

## Разработка и верификация методики моделирования ударно-волновых процессов при запуске ДУ

Для решения поставленной задачи была разработана и отработана методика расчета средствами ПК FlowVision ударно-волновых процессов при запуске ДУ САС ПТК.

Отработка включала исследования по оптимизации размеров и качества ячеек расчетной сетки и шага интегрирования по времени.

Критерием для выбора размеров и качества ячеек расчетной сетки [1] являлось корректное формирование струи газов, выходящих из сверхзвукового сопла ДУ. Для этого были проведены параметрические расчеты, в кото-

рых изменялась сетка за соплом в объеме конуса (рис. 2) и контролировалось изменение давления в точках пространства, находящихся на разном расстоянии от сопла в направлении истечения струи. Качество и размер ячеек считались удовлетворительными, если дальнейшее их улучшение не приводило к существенному изменению результата. Внутри сопла и в области газового коллектора сетка изначально имела 4-й уровень адаптации, что соответствовало размеру ячейки порядка  $1/12$  от критического диаметра сопла  $d_{кр}$ . Адаптация в объеме конусов 2-го, 3-го, 4-го и 5-го уровня соответствовала размерам ячеек порядка  $1/3, 1/6, 1/12, 1/24 d_{кр}$ .

На рис. 3 приведены результаты расчетов временных зависимостей давления в контролируемой точке № 3, расположенной на пути следования струи газов. Сравнения показывают, что корректное формирование струи произошло на 4-м уровне адаптации, и параметры струи на 5-м уровне адаптации практически не менялись. Согласно про-

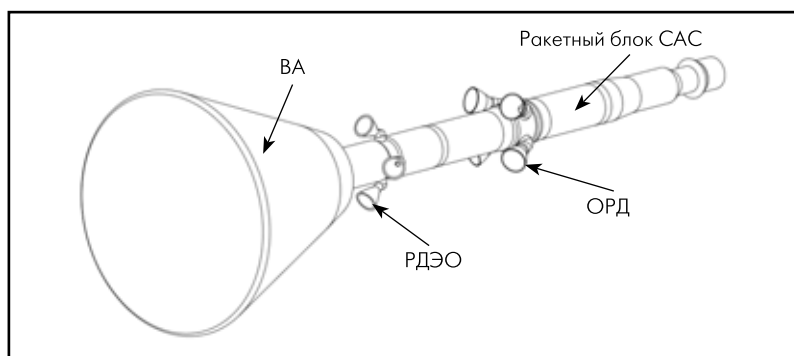


Рис. 1. Общий вид ВА ПТК с ракетным блоком САС

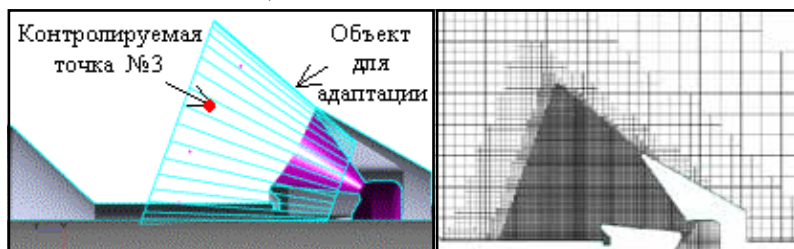


Рис. 2. Построение сетки в области формирования струи газов при выходе из сопла. Слева показан конический объект для адаптации. Справа – расчетная сетка с 5-м уровнем адаптации

веденному исследованию, для итоговых расчетов запуска ДУ ОРД и РДЭО в области формирования сверхзвуковой струи была принята расчетная сетка с размером ячейки, соответствующим 4-му уровню адаптации. Для повышения точности оценки ударно-волновых воздействий на всем пути следования ударной волны от сопла и вдоль поверхности САС и ВА размер расчетных ячеек не менялся.

Параметрические расчеты с различными значениями шага интегрирования по времени показали, что в случае сверхзвуковых скоростей наиболее точный расчет достигается при использовании явного шага по времени, соответствующего числу КФЛ, равному 1.

На рис. 4 приведены рассчитанные при различных числах КФЛ зависимости давления от времени в контрольной точке ДП1 в процессе запуска ДУ ОРД, из которых следует, что при шаге 3 КФЛ возникают паразитные пики давления. Таким образом, для всех рассматриваемых случаев данного типа задачи можно проводить расчет от начала до конца с шагом по времени, соответствующим КФЛ=2, с достаточной точностью и хорошей сходимостью.

В методике учитывалось смешение двух различных газов (высокотемпературных продуктов сгорания, вытекающих из сопла, и воздуха в окружающей среде), так как их термодинамические параметры существенно отличаются. Подход с использованием одного вещества, применявшийся в более раннем совместном с ОАО "РКК "Энергия" исследовании влияния работающих ДУ ПТК на аэродинамику ВА [2], в данном случае мог дать недопустимую погрешность.

В силу крайне малого времени протекания исследуемого процесса при расчетах не активировались модели турбулентности.

Для верификации методики было выполнено численное моделирование условий и режимов испытаний масштабной модели ВА ПТК с реактивным блоком САС на газодинамическом стенде ФГУП ЦНИИмаш. Общий вид масштабной модели и расположение датчиков на поверхности модели ВА показаны на рис. 5.

Были проведены расчеты, моделирующие режимы испытаний установки.

Сравнение результатов численного моделирования различных случаев запуска ДУ на масштабной модели с экспериментальными данными с датчиков давления на модели позволило сделать вывод, что разра-

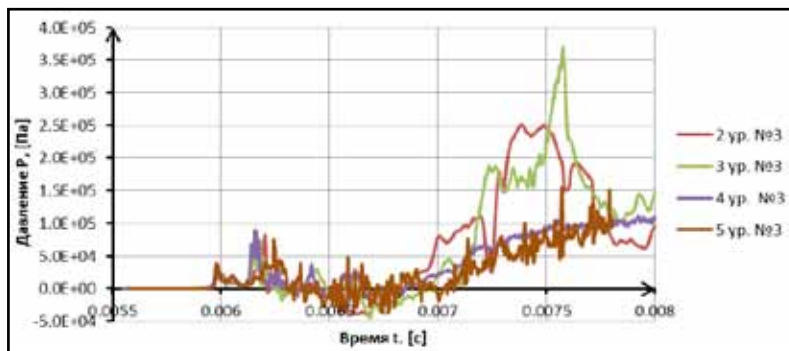


Рис. 3. Распределения давления по времени в контролируемой точке № 3

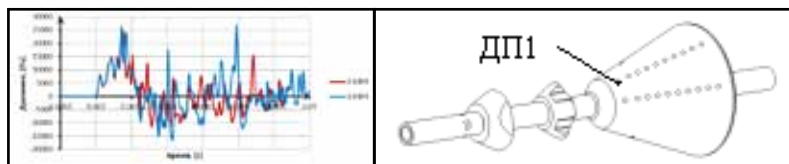


Рис. 4. Распределение давление по времени (слева) в точке установки датчика давления ДП1 (справа) при расчете с шагом интегрирования по времени 2 КФЛ (красная линия) и 3 КФЛ (синяя)

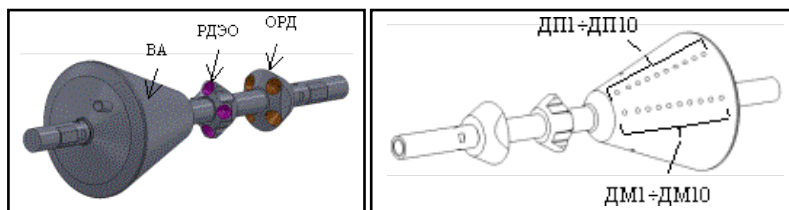


Рис. 5. Общий вид масштабной модели ВА с ракетным блоком САС. Места установки датчиков на модели (справа): ДП1-10 в плоскости сопла ОРД; ДМ1-10 – в плоскости сопла РДЭО

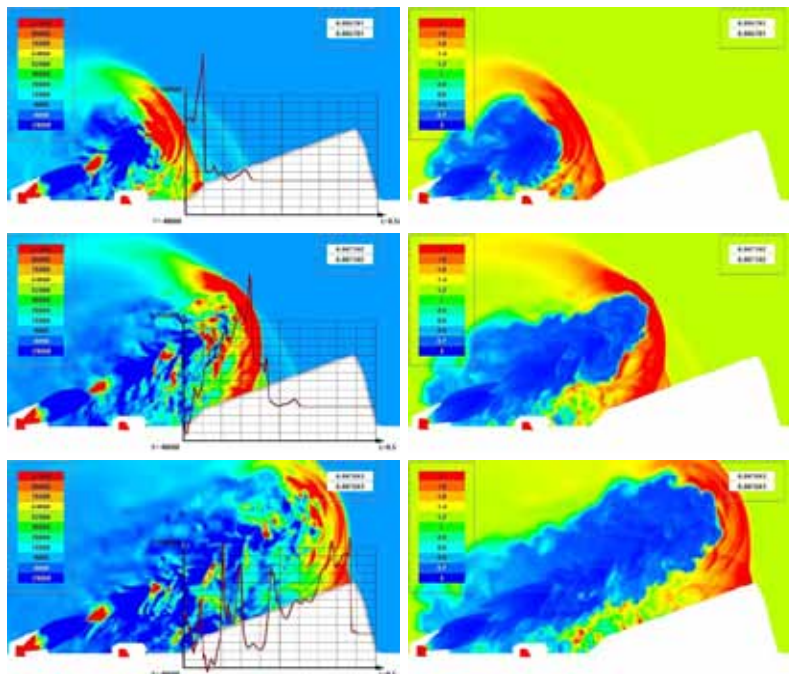


Рис. 6. Распределение давления (слева) и плотности (справа) в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД

ботанная методика работоспособна и адекватна, по крайней мере в части моделирования ударно-волновых процессов при запуске ДУ САС и оценки ударно-волновых воздействий на возвращаемый аппарат ПТК.

На рис. 6 представлены результаты расчета одно-временного запуска ДУ ОРД и РДЭО на масштабной модели: поля давления в области ВА и графики давле-

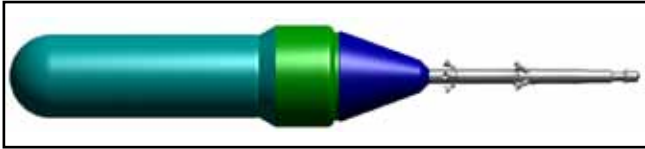


Рис. 7. Компоновка ПТК с блоком САС в составе РКН для расчетов

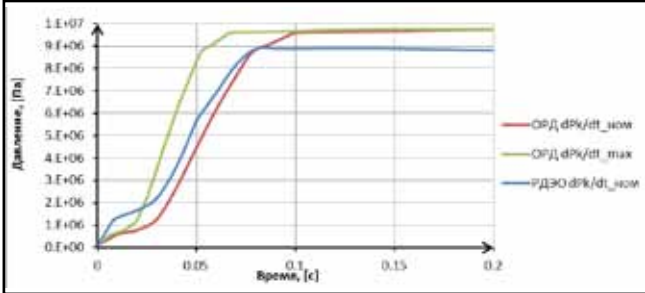


Рис. 8. Давления выхода на режим ДУ ОРД и РДЭО (для ОРД – номинальный и максимальный градиенты выхода на режим; для РДЭО – номинальный режим)

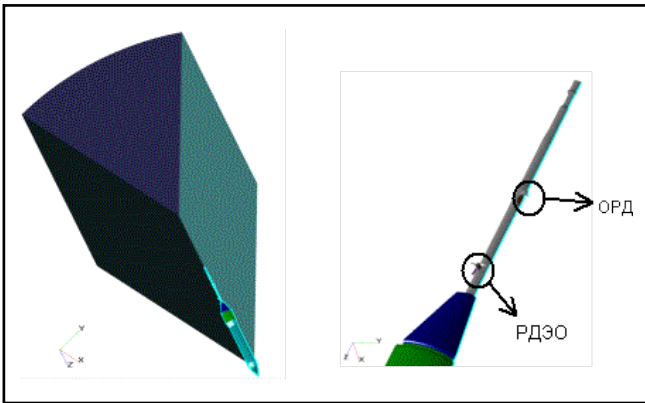


Рис. 9. Расчетная область – сектор 45°

ния по поверхности ВА в разные моменты времени, иллюстрирующие распространение ударной волны вдоль ВА и распределение плотностей.

## Моделирование ударно-волновых воздействий на ВА при старте и полете ракеты-носителя

Для моделирования ударно-волновых воздействий на ВА от запуска двигательных установок ОРД и РДЭО САС при старте и полете ракеты-носителя с ПТК (числа Маха полета  $M_\infty \sim 0$  и 1,5) использовалась компоновка, включающая фрагмент РКН, обтекатель двигательного отсека ПТК, ВА и реактивный блок САС. Внешние обводы компоновки представлены на рис. 7.

В ходе расчетов были смоделированы следующие режимы запуска двигательной установки САС:

- ▶ запуск ОРД, запуск РДЭО или запуск ОРД и РДЭО одновременно;
- ▶ неодновременный последовательный запуск ОРД и РДЭО;
- ▶ запуск ОРД с различными значениями градиента давления в камере ДУ (рис. 8);
- ▶ запуск ОРД с различными значениями давления вскрытия заглушки ДУ.

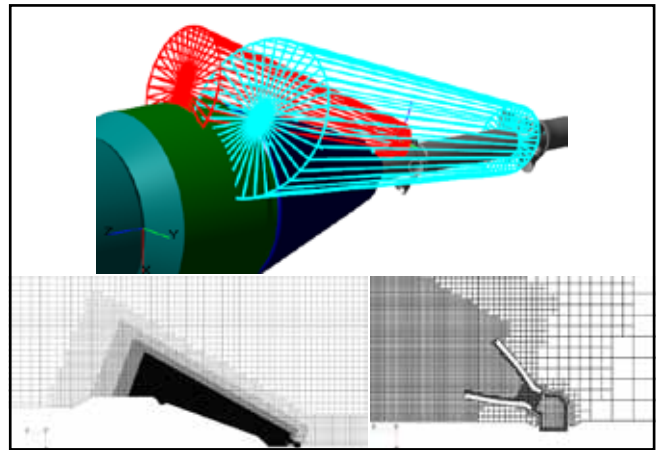


Рис. 10. Объекты для адаптации расчетной сетки (вверху). Расчетная сетка варианта запуска ДУ РДЭО (внизу слева). Расчетная сетка в области сопла ДУ РДЭО (внизу справа)

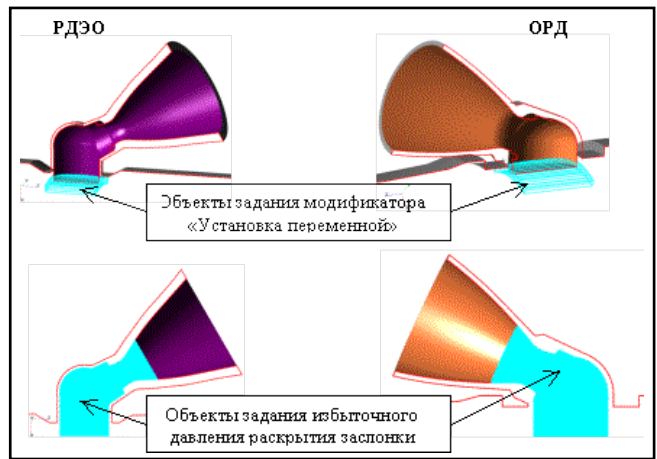


Рис. 11. Объекты для задания граничных условий запуска ДУ ОРД и РДЭО

При моделировании в ПК FlowVision для уменьшения счетного времени и экономии расчетных ресурсов, а также учитывая симметричность геометрии, была выбрана секторная постановка задачи для всех расчетных случаев (рис. 9). Расчетная область представляла собой 45-тиградусный сектор цилиндра радиусом 40 м и высотой 43,5 м. Геометрическая модель компоновки с ПТК и САС была размещена таким образом, чтобы внутри расчетной области находилась половина сопла ОРД и половина сопла РДЭО. Плоскости симметрии расчетной области (боковые грани сектора) проходили через ось модели и оси сопел ОРД и РДЭО.

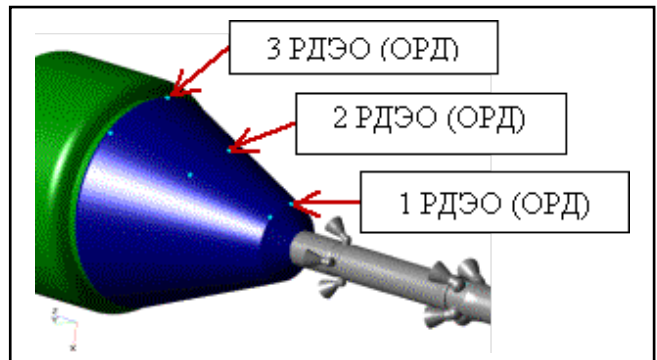


Рис. 12. Точки контроля давления на ВА в процессе расчета

При решении задачи использовалась неравномерная расчетная сетка, но для достижения наиболее точных результатов в области истечения струй ДУ САС вдоль ВА реализована сетка с идеально кубическими ячейками. На пути следования ударной волны использовалась адаптация 4-го уровня в объемах конусов (рис. 10).

Для задания граничных условий, моделирующих работу ДУ ОРД и РДЭО, использовался модификатор “установки переменной” в объеме заданного объекта в газовом коллекторе перед соплами (Рис. 11). Здесь задавались: давление выхода на режим (рис. 8) в виде таблицы значений, зависящих от времени; массовая концентрация вещества продуктов сгорания по отношению к воздуху  $СПС=1$ ; температуры продуктов сгорания. Начало работы ДУ моделировалось установкой избыточного давления внутри газового коллектора и частично в области сопла. С помощью начального избыточного давления имитировался момент срабатывания раскрытия заслонки.

Контролируемыми результатами данной работы являлись графики распределения давления по поверхности ВА и поля давления и плотности вблизи поверхности ВА в различные моменты времени. В процессе расчета также контролировалось давление в точках, расположенных на поверхности ВА: три точки в плоскости сопла ОРД и три точки в плоскости сопла РДЭО (рис. 12)

Сравнение результатов моделирования запуска ДУ ОРД при задании различных значений избыточного давления срабатывания заглушки (2 и 6 ати соответственно) показало (рис. 13), что первые импульсы давления достигают поверхности ВА с задержкой по времени около 0,01 с, а их амплитуда почти в 2 раза больше. Но влияние этих первичных импульсов мало по сравнению с последующим ударно-волновым воздействием на конструкцию ВА.

Основные результаты “чистовых” расчетов для натурного ПТК с САС представлены на рис. 14-16. На рис. 14 приведены в сравнении временные зависимости давления в контролируемых точках 1 ОРД и 1 РДЭО в случаях одновременного запуска ДУ ОРД и РДЭО в условия старта и полета РКН с ПТК (числа Маха  $M_{\infty} \sim 0$  и 1,5). На рис. 15 и 16 представлены поля давлений и плотностей в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД в условия старта и полета РКН с ПТК.

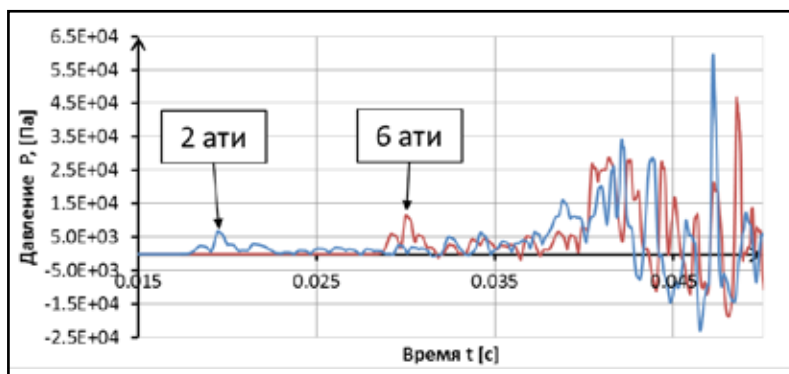


Рис. 13. Распределение давления по времени в контролируемой точке № 1, расположенной в плоскости работающего сопла ОРД при различных значениях избыточного давления раскрытия заглушки

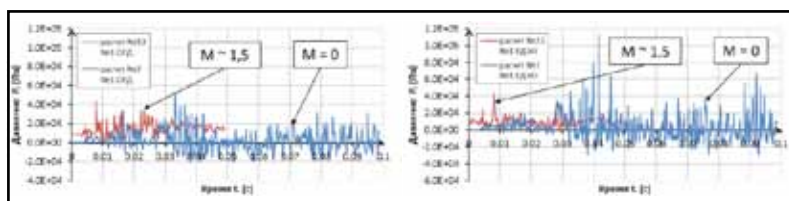


Рис. 14. Сравнение распределения давления по времени в контролируемой точке № 1 ОРД (слева) и № 1 РДЭО (справа) при одновременном запуске ОРД и РДЭО в условиях старта (синяя кривая) и полета (красная кривая) РКН с ПТК (числа Маха  $M=0$  и  $M \sim 1,5$ )

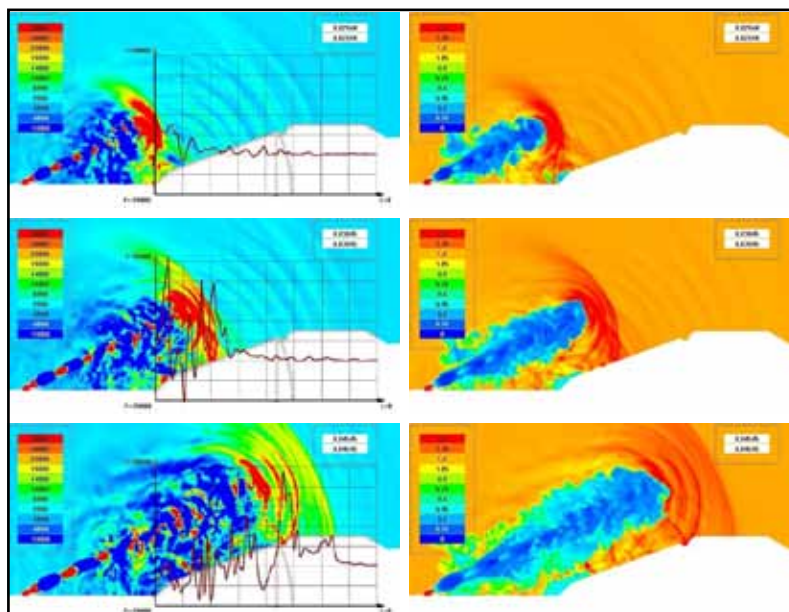


Рис. 15. Распределение давления (слева) и плотности (справа) в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД при старте РКН с ПТК ( $M_{\infty} \approx 0$ )

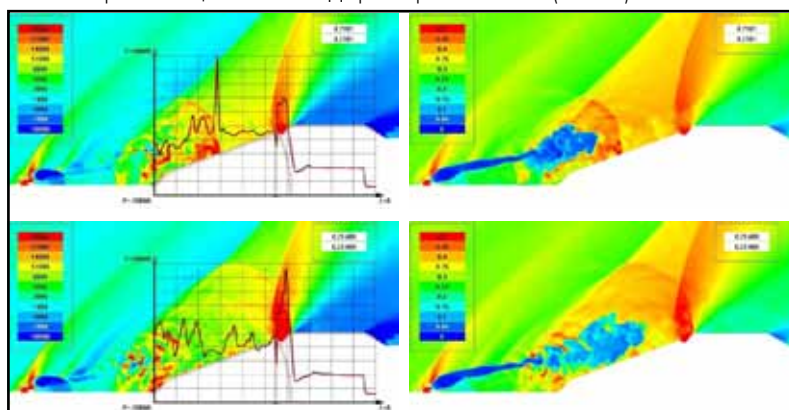


Рис. 16. Распределение давления (слева) и плотности (справа) в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД в условия выведения ПТК ( $M_{\infty} \sim 1,5$ )

## Заключение

В ходе проведенного исследования разработана и отработана методика расчетов средствами ПК FlowVision ударно-волновых воздействий на пилотируемый транспортный корабль при срабатывании реактивной системы аварийного спасения.

Методика верифицирована численным моделированием физического эксперимента на газодинамических моделях ВА и реактивного блока САС масштаба М1:10 для условий старта РКН с ПТК.

Использование методики позволило получить оценки ударно-волновых воздействий на ВА в случаях срабатывания САС при старте РКН и в процессе выведения ПТК (следует отметить, что экспериментальная база для физического моделирования режимов запуска ДУ САС при полете РКН отсутствует).

В результате расчетов получено, что:

- ▶ наибольшие ударно-волновые давления на внешней поверхности ВА, достигающие 0,6 ати, реализуются при одновременном запуске ДУ ОРД и РДЭО;
- ▶ амплитуды ударно-волновых давлений на конструкции ВА при срабатывании ДУ САС на участке выведения ПТК не превышают соответствующие воздействия при старте РКН с ПТК.

*Т. В. Маркова, И. В. Москалев,  
А. А. Аксенов, к.ф.-м.н., компания "ТЕСИС",  
А. А. Дядькин, к.т.н., С. П. Рыбак,  
ОАО "РКК "Энергия"*

## Литература

1. Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V. – Overcoming of barrier between CAD and CFD by modified finite volume method // Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conf. San Diego. ASME PVP. 1998. Vol. 377-1.

2. Дядькин А.А., Михайлова М.К., Сухоруков В.П., Щеляев А.Е. Математическое моделирование обтекания возвращаемого аппарата с работающей посадочной двигательной установкой // Труды международной научно-практической конференции "Инженерные системы – 2011", Москва, 2011 г. – Том I. М.: РУДН, 2011 – 164 с.

**ТЕСИС**  
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
– В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

3D Transvidia – трансляция и проверка качества 3D моделей  
ABAQUS – прочность  
FlowVision – гидродинамика  
DEFORM – обработка металлов давлением

www.tesis.com.ru    www.flowvision.ru  
Тел/Факс: (495) 612-4422, 612-42-62,  
E-mail: info@tesis.com.ru

## НОВОСТИ

