

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОЗВРАЩАЕМЫЙ АППАРАТ ПИЛОТИРУЕМОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ

Маркова Т.В.<sup>1</sup>, Москалев И.В.<sup>1</sup>,

к.ф.-м.н. Аксенов А.А.<sup>1</sup>, к.т.н. Дядькин А.А.<sup>2</sup>, Рыбак С.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ОАО «РКК «Энергия» г. Королёв, Россия

## Введение

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 (см. Рис. 1), и оказывают импульсное силовое воздействие на его конструкцию.

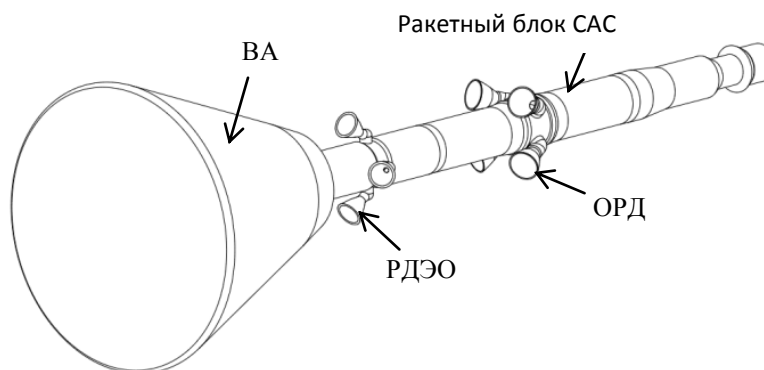


Рис. 1 – Общий вид ВА ПТК с ракетным блоком САС

Целью данного исследования являлось численное моделирование средствами программного комплекса FlowVision нестационарных газодинамических (ударно-волновых) воздействий на ВА от запуска двигательных установок основного ракетного двигателя (ОРД) и ракетного двигателя экстренного отделения (РДЭО) САС на стартовом участке полета 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 которых 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-м, 3-м, 4-м и 5-м уровнями соответствовала размерам ячеек порядка 1/3, 1/6, 1/12, 1/24  $d_{кр}$ .

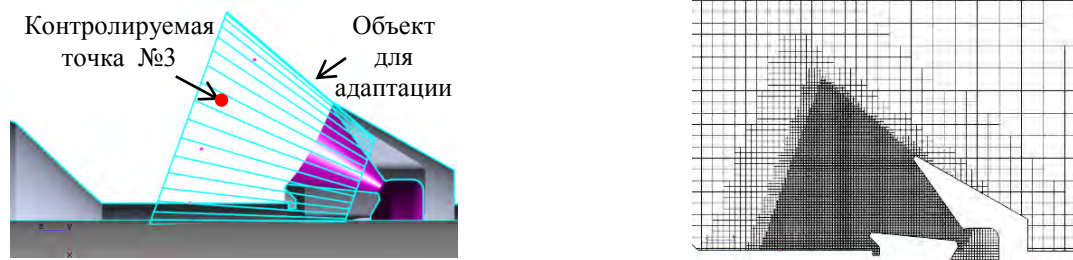


Рис. 2 – Построение сетки в области формирования струи газов при выходе из сопла. Слева показан конический объект для адаптации. Справа – расчетная сетка с 5-м уровнем адаптации в объеме конуса.

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 практически не менялись на 5-м уровне адаптации. Согласно проведенному 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.

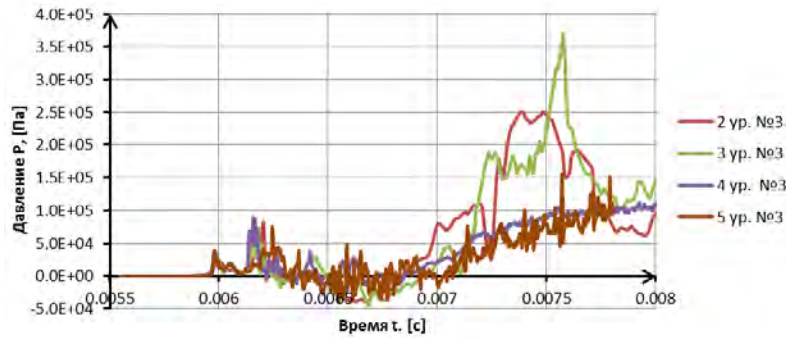


Рис. 3 – Распределения давления по времени в контролируемой точке №3.

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 Рисунке 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.

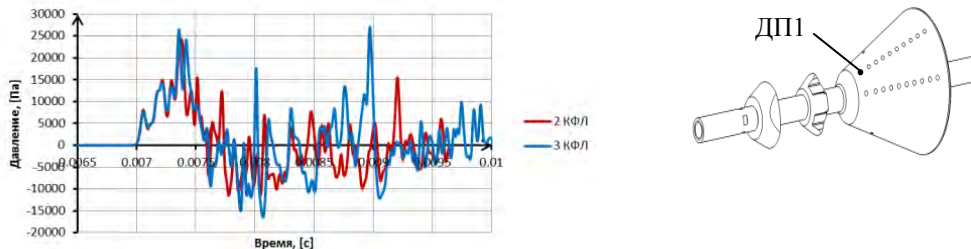


Рис. 4 – Распределение давления по времени (справа) в точке установки датчика давления ДП1 (слева) при расчете с шагом интегрирования по времени 2 КФЛ (красная линия) и 3 КФЛ (синяя).

В методике учитывалось смешение двух различных газов (высокотемпературных продуктов сгорания, вытекающих из сопла, и воздуха в окружающей среде), т.к. их термодинамические параметры существенно отличаются. *(Подход с использованием одного вещества, применявшийся в более раннем совместном с 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 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.

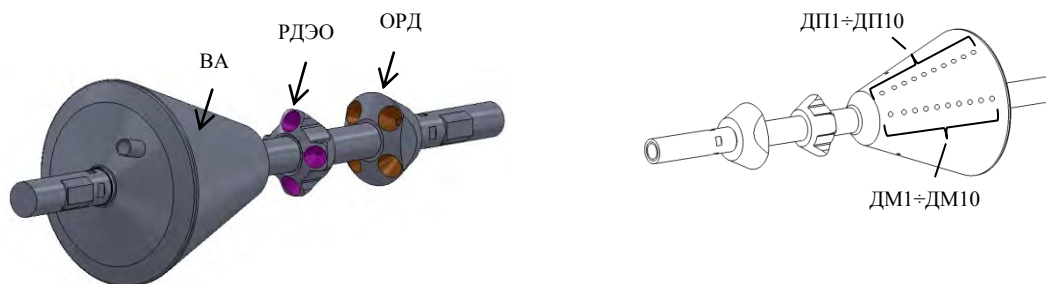


Рис. 5 – Общий вид масштабной модели ВА с ракетным блоком САС. Места установки датчиков на модели (слева): ДП1-10 в плоскости сопла ОРД; ДМ1-10 – в плоскости сопла РДЭО.

**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 разработанная 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 одновременного запуска ДУ ОРД и РДЭО на масштабной модели: поля давления в области ВА и графики давления по поверхности ВА в разные моменты времени, иллюстрирующие распространение ударной волны вдоль ВА, распределение плотностей.

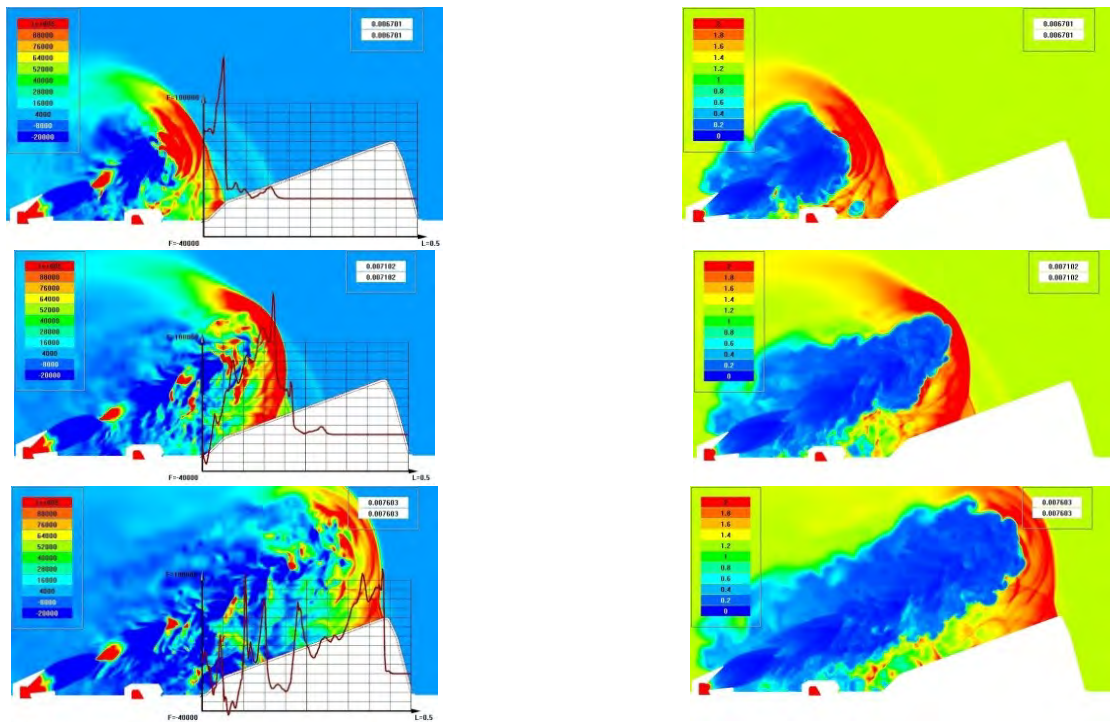


Рис. 6 – Распределение давления (слева) и плотности (справа) в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД.

### 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.

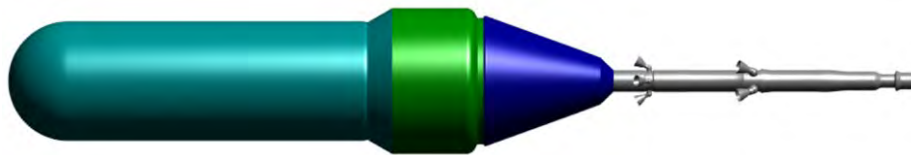


Рис. 7 – Компоновка ПТК с блоком САС в составе РКН для расчетов.

В ходе расчетов были смоделированы следующие режимы запуска ДУ 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 давлениями вскрытия заглушки ДУ.

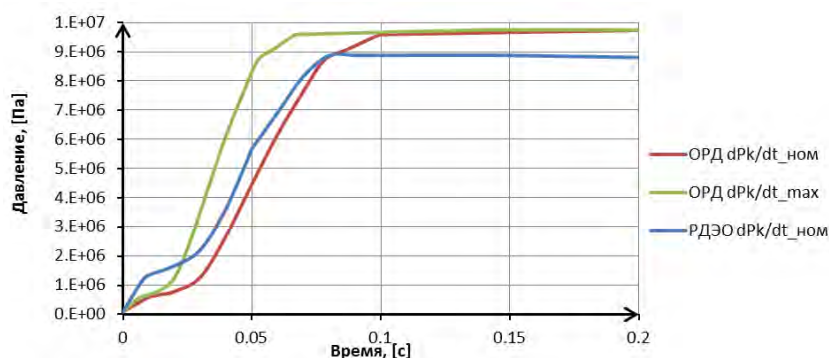


Рис. 8 – Давления выхода на режим ДУ ОРД и РДЭО (для ОРД - номинальный и максимальный градиенты выхода на режим; для РДЭО – номинальный режим)

При моделировании во FlowVision для уменьшения счетного времени и экономии расчетных ресурсов, а также с учетом симметричности геометрии, выбрана секторная постановка задачи для всех расчетных случаев (рисунок 9). Расчетная область представляла собой 45-тиградусный сектор цилиндра радиусом 40 м и высотой 43,5 м. Геометрическая модель компоновки с ПТК и САС размещена так, что внутри расчетной области находится половина сопла ОРД и половина сопла РДЭО. Плоскости симметрии расчетной области (боковые грани сектора) проходили через ось модели и оси сопел ОРД и РДЭО.



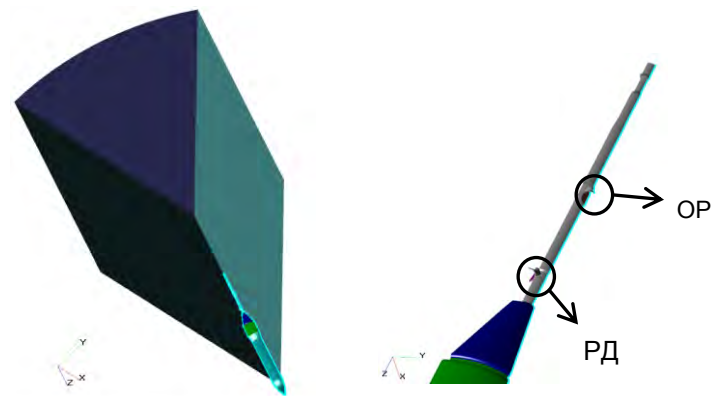


Рис. 9 – Расчетная область – сектор 45°

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).

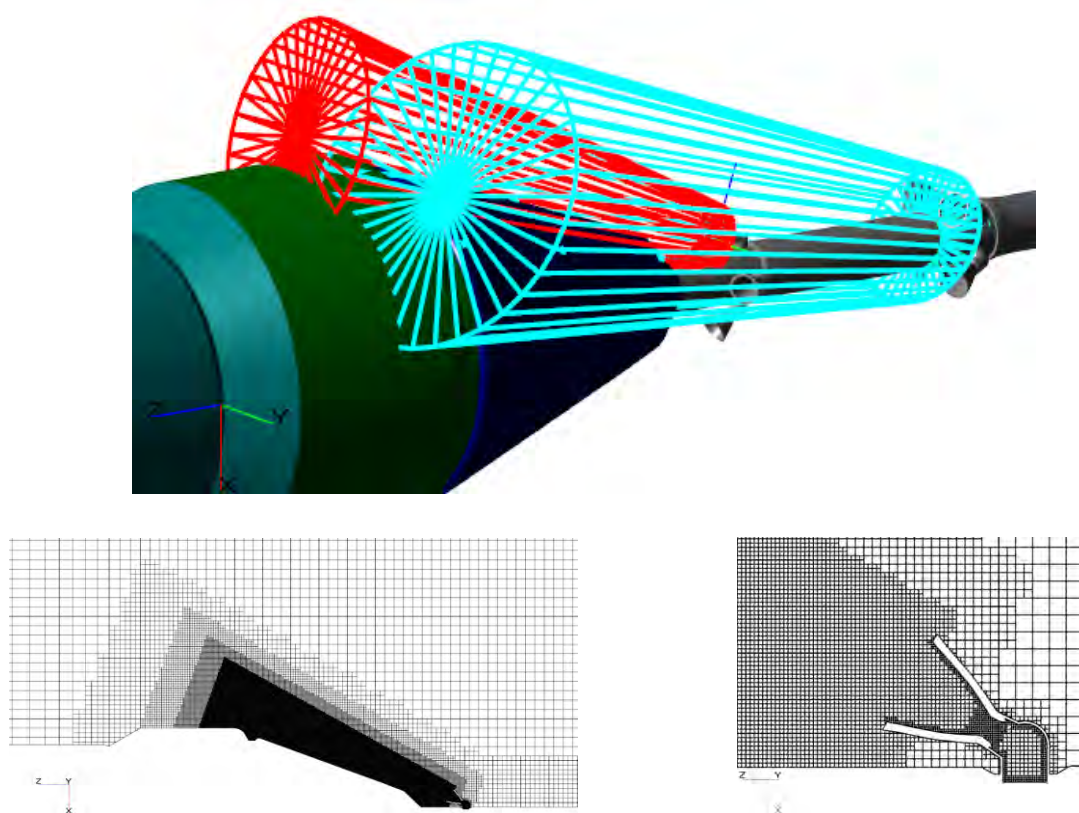


Рис. 10 – Объекты для адаптации расчетной сетки (вверху)  
 Расчетная сетка варианта запуска ДУ РДЭО (внизу слева)  
 Расчетная сетка в области сопла ДУ РДЭО (внизу справа)

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  $C_{ПС}=1$ ; 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.

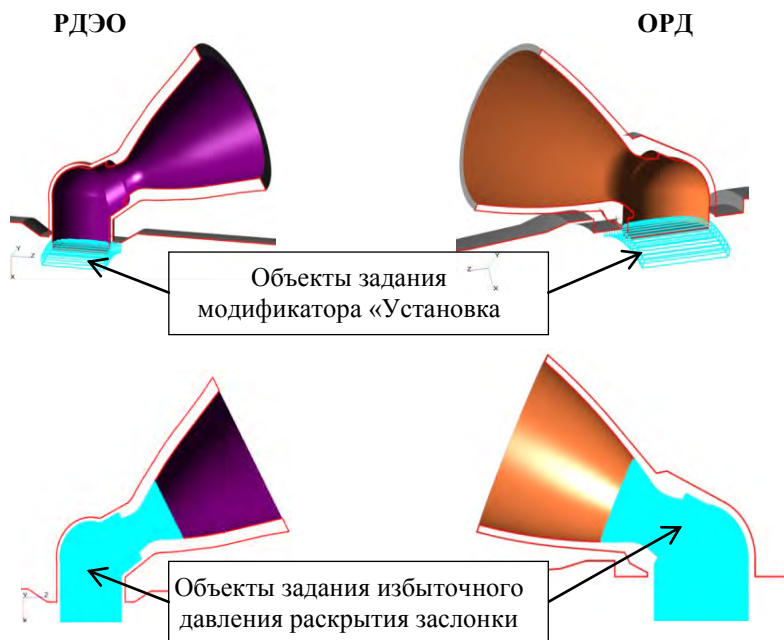


Рис. 11 – Объекты для задания граничных условий запуска ДУ ОРД и РДЭО.

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: 3 точки в плоскости сопла ОРД и 3 точки в плоскости сопла РДЭО (Рис. 12).

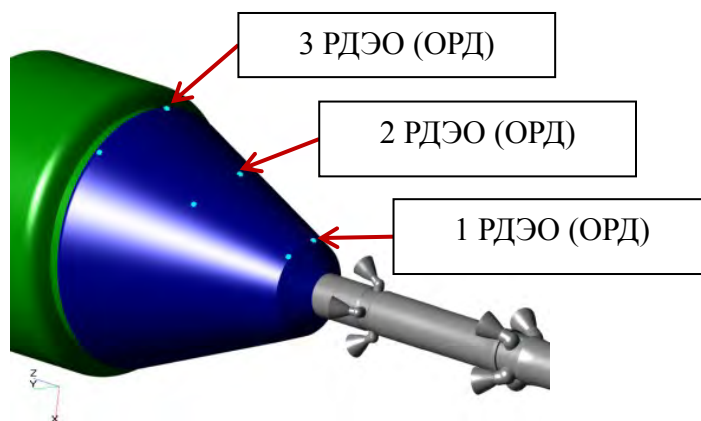


Рис. 12 – Точки контроля давления на ВА в процессе расчета

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.

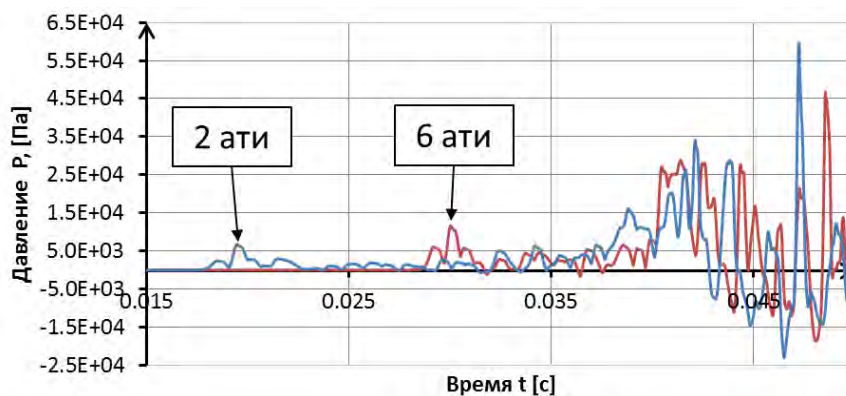


Рис. 13 – Распределение давления по времени в контролируемой точке 1, расположенной в плоскости работающего сопла ОРД при различных значениях избыточного давления раскрытия заглушки.

Основные результаты «чистовых» расчетов для натурального ПТК с САС представлены на Рисунках 13 – 15. На Рисунке 13 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 Рисунках 14 и 15 представлены поля давлений и плотностей в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД в условия старта и полета РКН с ПТК.

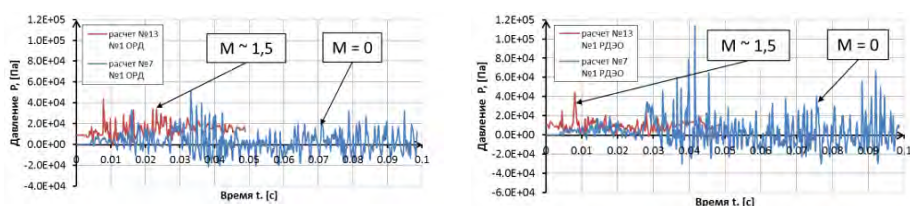


Рис. 13 – Сравнение распределения давление по времени в контролируемой точке №1 ОРД (слева) и №1 РДЭО (справа) при одновременном запуске ОРД и РДЭО в условиях старта (синяя кривая) и полета (красная кривая) РН с ПТК (числа Маха  $M=0$  и  $M \sim 1,5$ )

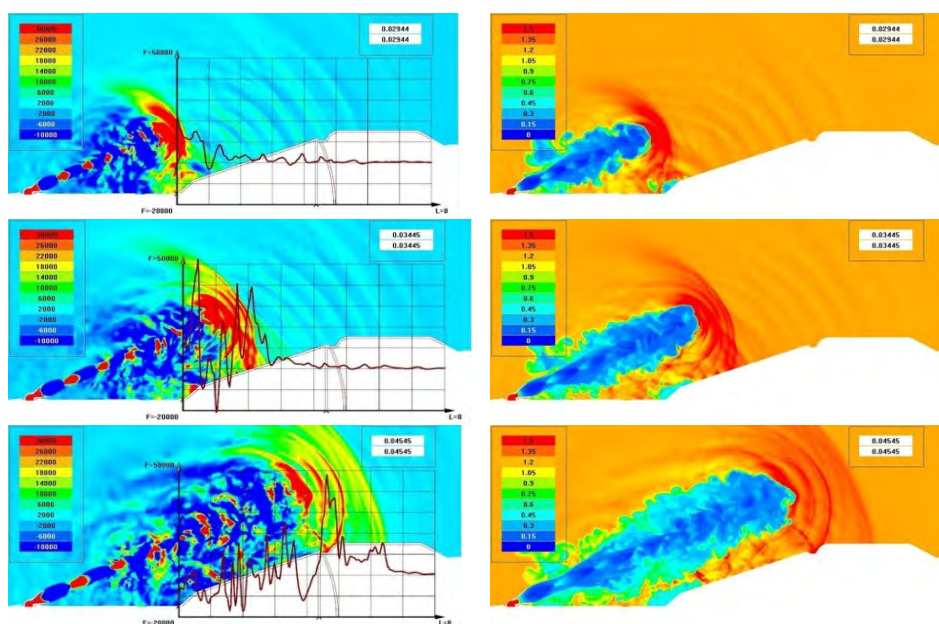


Рис. 14 – Распределение давления (слева) и плотности (справа) в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД при старте РКН с ПТК ( $M_\infty \approx 0$ ).

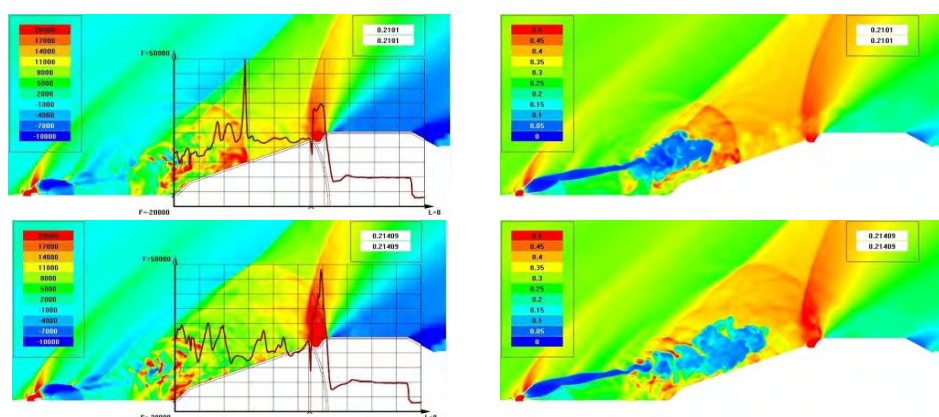


Рис. 15 – Распределение давления (слева) и плотности (справа) в области ВА в плоскости работающего сопла ОРД в условиях выведения ПТК ( $M_\infty \sim 1,5$ ).

## Заключение

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.

## Список литературы

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.