

**Численное моделирование отрывных течений газа внутри плоского сверхзвукового сопла с применением программного комплекса FloEFD**

М.С. Антипова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Ракетная космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева»

Не секрет, что инженерная практика традиционно опирается на проведение экспериментальных исследований, так как это обеспечивает высокую достоверность получаемых результатов, а значит и высокую надежность проектируемых изделий. Однако проведение любого экспериментального исследования требует больших затрат, средств и времени на его реализацию. Поэтому во многих случаях оптимальным вариантом в процессе создания техники является сочетание расчетных и экспериментальных исследований.

За последнее время методы численного математического моделирования стали активно применяться в научных и конструкторских разработках. В связи с этим широкое распространение в промышленности получили различные вычислительные программные комплексы. В соответствии с принятой в РКК «Энергия» практикой компьютерного моделирования [1] промышленным расчетам предшествует проведение тестовых расчетов, подтверждающих целесообразность использования пакета для решения поставленных задач. Такой подход помогает выявить возможности программы решать задачи, принадлежащие определенному классу физических явлений. В данной работе, для тестирования программного пакета FloEFD [2] на предмет возможности его использования для исследования струйных течений, была поставлена задача моделирования отрывных течений газа внутри плоского сверхзвукового сопла. Для валидации результатов расчетов использованы экспериментальные и расчетно-теоретические данные [3].

В экспериментальных данных рассматривались течения в плоском сопле, профиль которого представлен на рисунке 1. Показана используемая система координат, в которой ось OX направлена вдоль плоскости симметрии сопла, а начало координат совпадает с началом конфузорной части сопла.

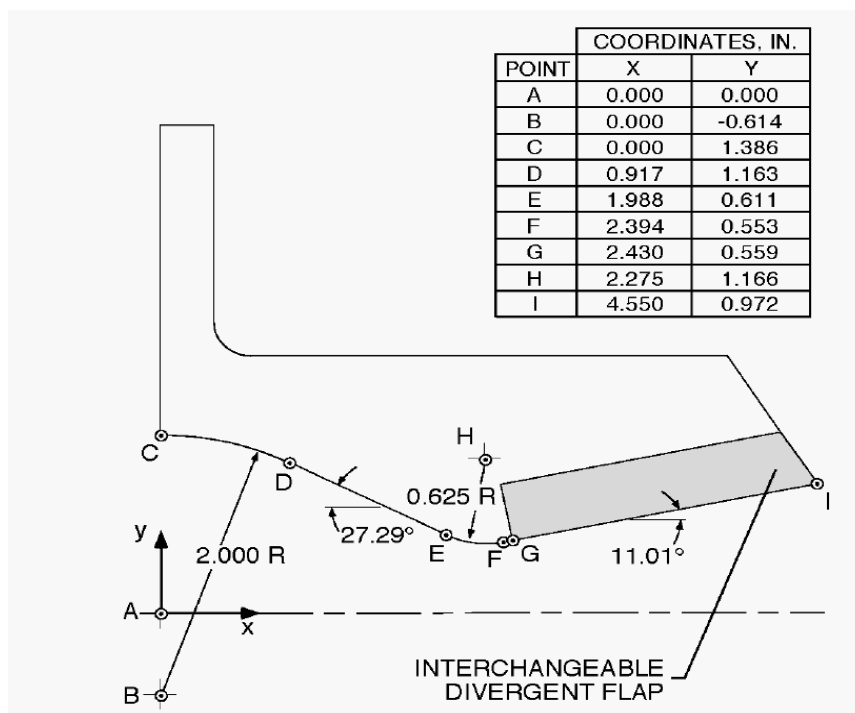


Рис. 1. Профиль плоского сопла.

В эксперименте варьировалось отношение давления на входе в сопло к внешнему давлению ( $NPR = \frac{P_0}{P_a}$ ). В расчетах также отношение  $NPR$  достигалось изменением давления на входе, когда внешнее давление оставалось постоянным ( $P_a = 100525 \text{ Па}$ ). Расчеты были проведены для отношений давлений  $NPR = 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.4, 3.0, 8.78$ . В ходе численного моделирования были получены визуализация течений и распределения давления на стенке сопла. Расчеты проводились в двумерной постановке.

На рисунке 2 представлен фрагмент расчетной сетки. Общее количество элементов расчетной сетки составило более 1 млн. В процессе расчета сетка не адаптировалась по градиенту.

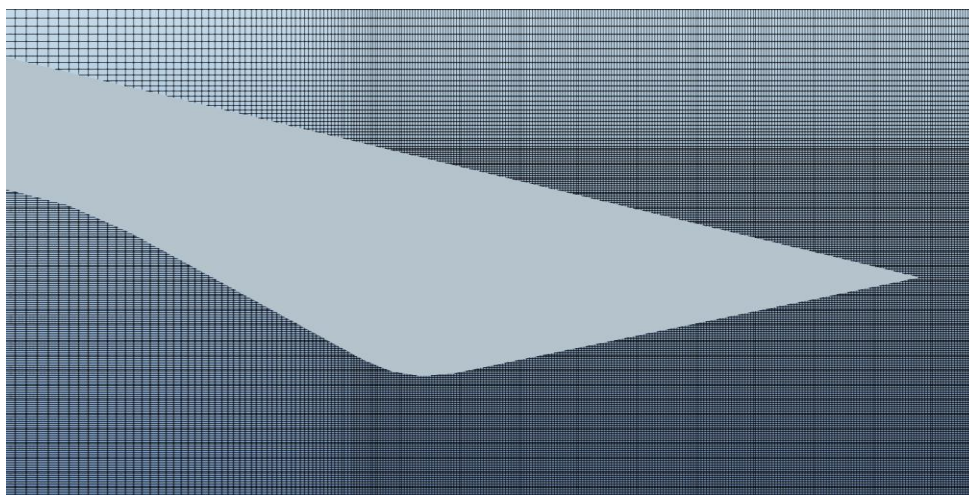


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки.

Движение вязкой сжимаемой жидкости в программном пакете FloEFD описывается уравнениями Навье-Стокса, представляющие математическое выражение законов сохранения массы, энергии и импульса. FloEFD использует одну систему уравнений для описания как ламинарных, так и турбулентных течений. Более того осуществляется переход из ламинарного состояния в турбулентное, и наоборот. При моделировании турбулентных потоков, для замыкания системы уравнений Навье-Стокса используется модифицированная  $k - \varepsilon$  модель турбулентной вязкости в модификации Лэма-Бремхорста.

### Визуализация течений

На рисунках 3 – 18 представлены картины течения в виде распределения градиента плотности для отношений давлений  $NPR = 1.8 - 3.0$ .

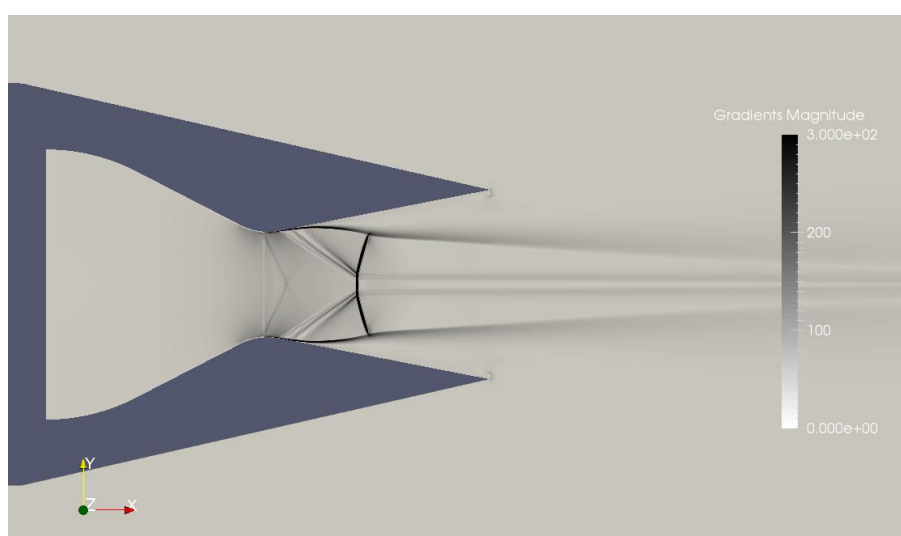


Рис.3 Градиент плотности для отношения давлений  $NPR = 1.8$ .

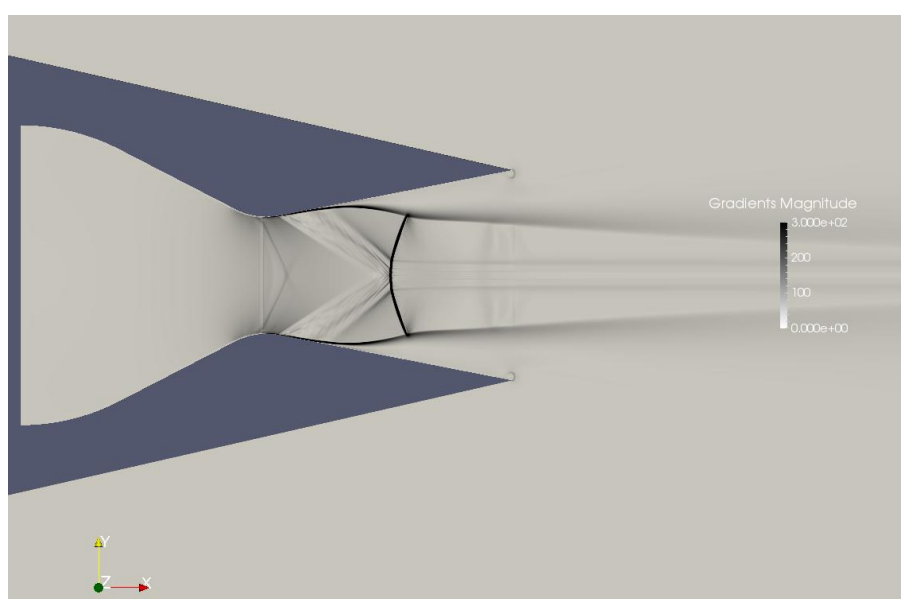


Рис.4. Градиент плотности для отношения давлений  $NPR = 2.0$ .

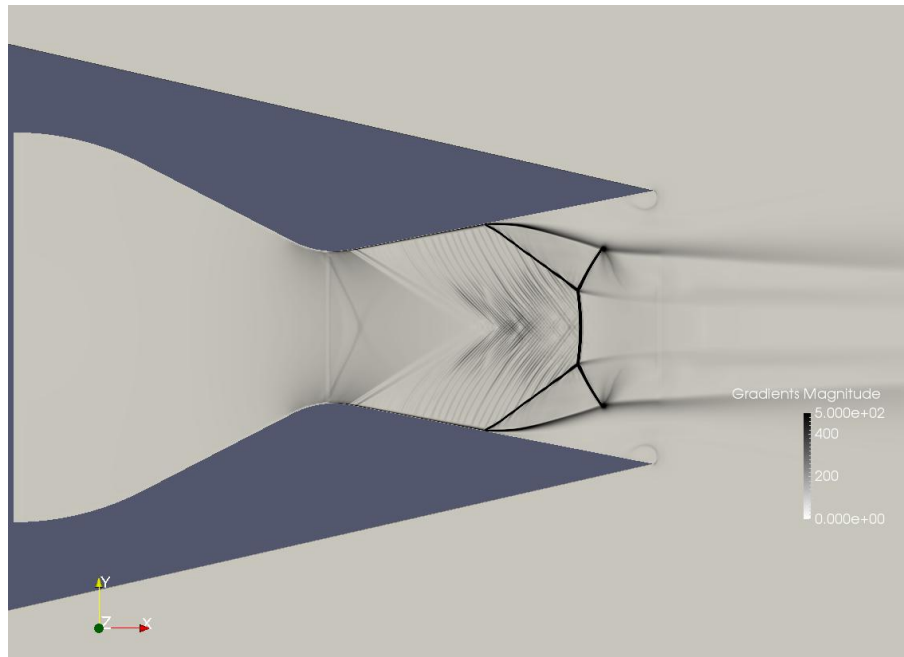


Рис.5. Градиент плотности для отношения давлений  $NPR = 2.4$ .

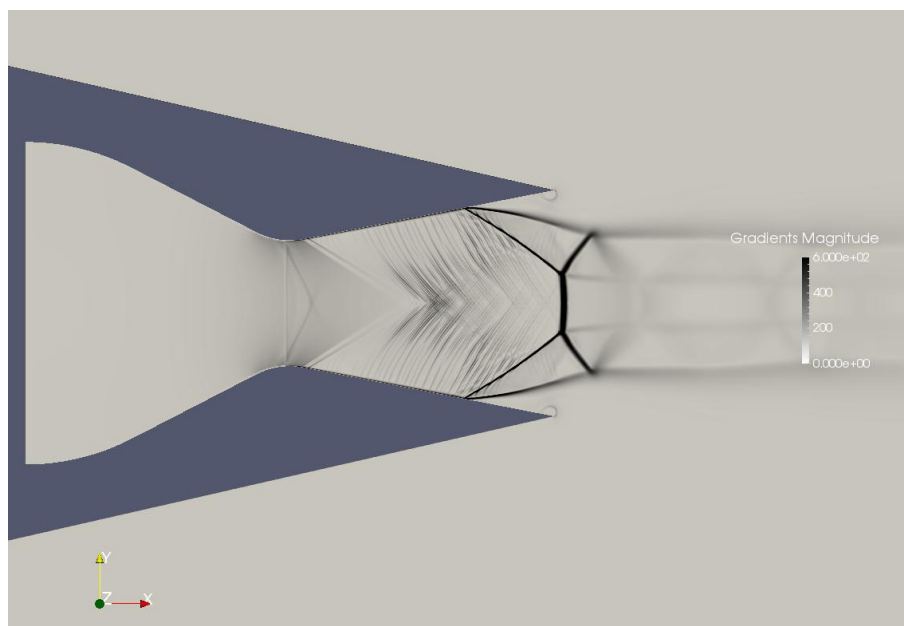


Рис.6. Градиент плотности для отношения давлений  $NPR = 3.0$ .

### Распределение давления по стенке сопла

Ниже приведены графики распределения давления по кромке сопла. Для расчетных случаев  $NPR = 1.4$  и  $1.6$ , представленных на рисунках 19-20, значения давления на стенке сопла осреднены, так как течение для данных случаев нестационарно, что приводит к

изменению положения точки отрыва во времени и, следовательно, к изменению давления на стенке сопла.

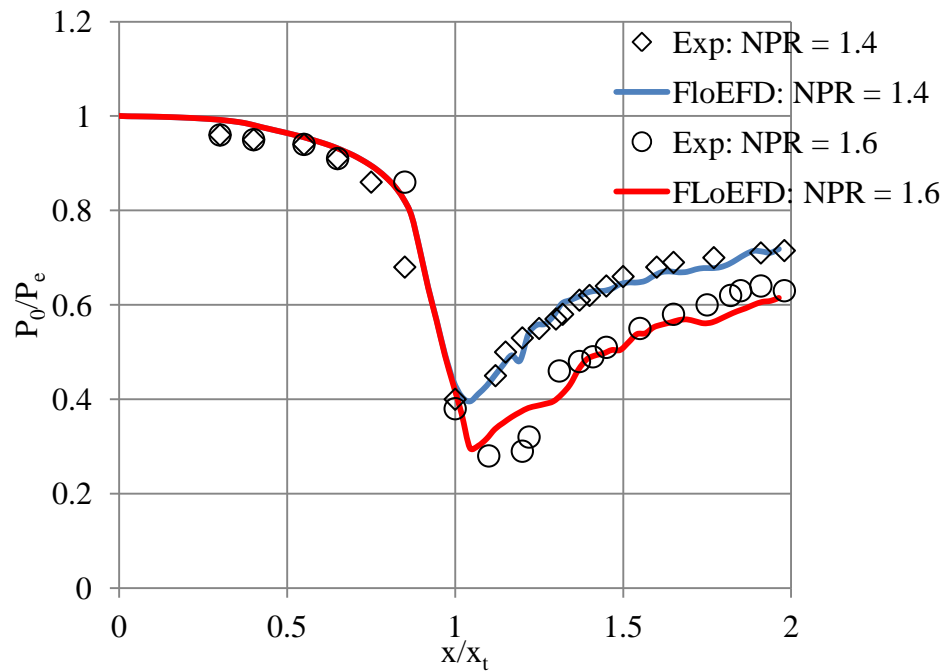


Рис. 7. График распределения давления  $P_e/P_0$  ( $P_e$  – статическое давление на стенке сопла,  $P_0$  – давление на входной границе) на стенке сопла для отношения давлений  $NPR = 1.4$  и  $1.6$ .

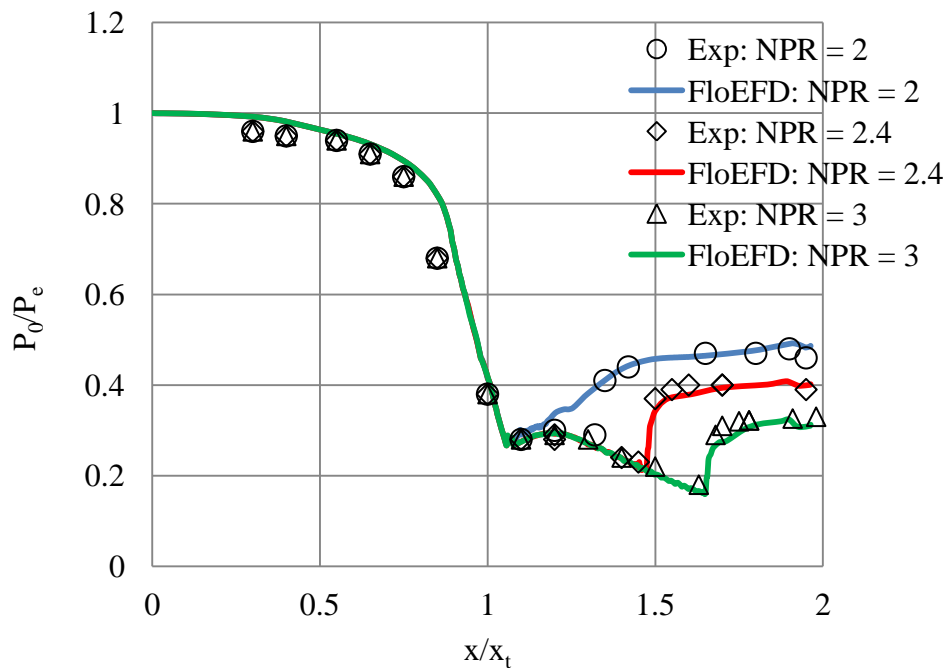


Рис. 8. График распределения давления  $P_e/P_0$  ( $P_e$  – статическое давление на стенке сопла,  $P_0$  – давление на входной границе) на стенке сопла для отношения давлений  $NPR = 2, 2.4$  и  $3$ .

Результаты, полученные в FloEFD по задаче с отрывными течениями внутри сверхзвукового сопла, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Возможной причиной расхождения результатов для расчетных случаев  $NPR = 1.4 - 2.0$  является наличие нестационарности течения, которая приводит к изменению положения точки отрыва и, следовательно, к изменению давления на стенке сопла.

Таким образом, анализируя результаты по поставленной выше задаче, можно сделать вывод, что программный пакет FloEFD может быть использован для исследований струйных течений, так как воспроизводит общую структуру течения, хорошо моделирует отрывные зоны и дает удовлетворительные результаты для ближнего поля течения при небольших затратах временных и вычислительных ресурсов.

### Литература

1. Алабова Н.П., Брюханов Н.А., Дядькин А.А., Крылов А.Н., Симакова Т.В. Роль компьютерного моделирования и физического эксперимента в исследованиях аэрогазодинамики ракетно-космических систем в процессе проектирования. - Космическая техника и технологии. - 2014. - №3 (6). - С.14-21.
2. Иванов А., Требунских Т., Думнов Г. Использование вычислительного комплекса FloEFD. Моделирование гидрогазодинамических процессов в повседневных задачах инженерной практики. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014, - 140 с.
3. Hunter C.A.. Experimental, Theoretical, and Computational Investigation of Separated Nozzle Flows.//34<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE. - 1998, - 13-15 pp.