

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ СУЖИВАЮЩЕГОСЯ СОПЛА

М.К. Михайлова^{1,а}, *ведущий инженер*, Ю.В. Фишер^{1,б}, *инженер*, А.Е. Щеляев^{1,в}, *менеджер*
¹ ООО «ТЕСИС», г. Москва,

Представленная работа проведена в рамках проведения международного семинара «AIAA Propulsion Aerodynamics Workshop». Цель семинара - оценка возможностей численного моделирования (в том числе сеток, моделей турбулентности, требований к вычислительным аппаратным ресурсам, метода моделирования) современных CFD-пакетов/кодов. Оценка точности CFD-расчетов проводится путем сравнения с полученными экспериментальными данными и набором статистических данных. Рассматривается одна из трех задач семинара – истечение воздуха из сужающегося сопла с различной геометрической конфигурацией. Располагаемая степень понижения давления в сопле варьируется от 1,4 до 7 единиц. Сравнение с экспериментом и расчетами в других CFD-кодах проводится по коэффициентам расхода и тяги сопла и по ударно-волновой картине в струе. По коэффициенту расхода сопла показано хорошее согласование расчетов FlowVision с экспериментом. По коэффициенту тяги расчет во FlowVision показал несколько завышенный по сравнению с экспериментом результат, но при этом хорошее совпадение с аналитическими данными и расчетами в пакете Ansys Fluent.

Введение

Работа по моделированию истечения из сужающегося сопла в ПК FlowVision проведена в рамках проведения международного семинара «AIAA Propulsion Aerodynamics Workshop». Целью семинара служит оценка возможностей численного моделирования (в том числе сеток, моделей турбулентности, требований к аппаратным вычислительным ресурсам, метода моделирования) современных CFD-пакетов/кодов. Оценка точности CFD-расчетов проводится путем сравнения с полученными экспериментальными и статистическими данными.

Постановка задачи

Рассматривается одна из задач семинара – истечение воздуха из сужающегося сопла на различных режимах. Предполагается осесимметричная двумерная постановка; расчетная область, показанная на рис.1, представляет собой в поперечном сечении сектор с углом 4°. Коническое сопло имеет радиус выхода 38,1 мм, одинаковый для всех вариантов сопел. В рамках первой задачи семинара рассматривается 4 варианта геометрии в секторной постановке:

- профилированное сопло;
- 15° конус;
- 25° конус;
- 40° конус.

Длина сопла (571,5 мм) и размеры расчетной области одинаковы для всех вариантов.

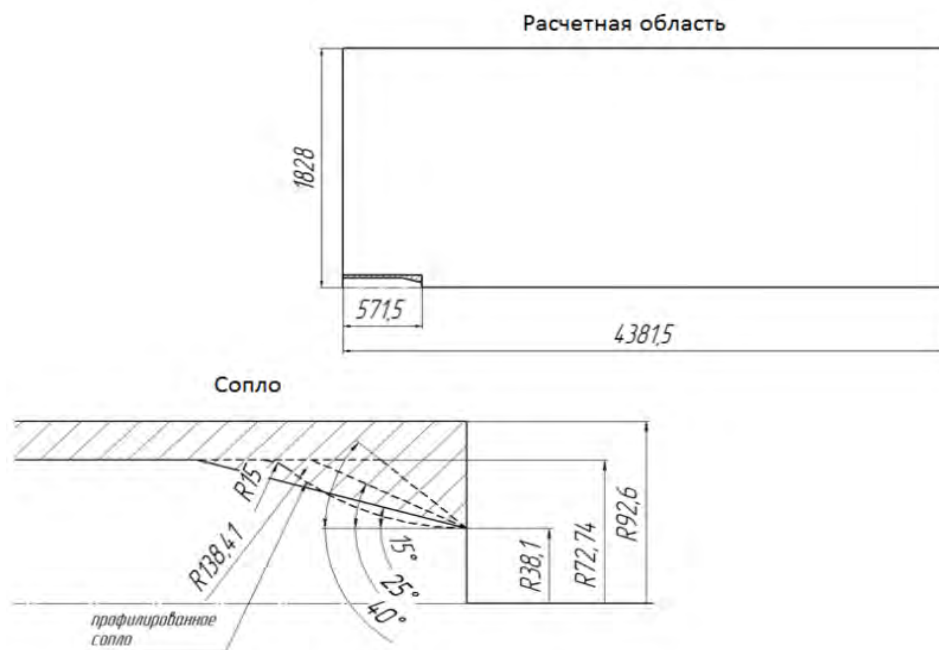


Рис.1 – Геометрические характеристики сопел (пунктиром показаны варианты сопел с углами 25°, 40°, а также профилированное сопло) и расчетной области

Располагаемая степень понижения давления в сопле (nozzle pressure ratio – NPR) варьируется от 1,4 до 7 единиц. В таблице 1 показана матрица расчетных случаев и отмечены исследуемые режимы.

Таблица 1

		NPR										
		1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0
Конфигурация сопла	Профилированное	●		●		●			●			●
	15	●		●		●			●			●
	25	●		●		●			●	●		●
	40	●		●		●			●			●

Задачи исследования - для каждого расчетного случая необходимо:

- определить коэффициенты расхода и тяги сопла;
- показать картину течения и, в частности, распределение числа Маха в струе;
- сравнить полученные данные с экспериментальным набором данных и результатами расчета в других CFD-пакетах.

Математическая модель

При моделировании воздух предполагается идеальным газом, свойства взяты из базы веществ ПК FlowVision.

Моделируемые физические процессы:

- теплоперенос в воздухе – конвекция и теплопроводность;
- движение Ньютоновской жидкости/газа;
- k-ε модель турбулентности (стандартная).

Начальные и граничные условия

При входе в сопло задавалось граничное условие для статической температуры $T_0 = 293 K$ и полного давления, которое рассчитывалось для каждого расчетного случая как произведение располагаемой степени понижения давления в сопле и давления окружающей среды (атмосферного):

$$p_0^* = NPR * p_n,$$

где $p_n = 101000 \text{ Па}$ – атмосферное давление.

При выходе из расчетной области заданы Неотражающие ГУ, ГУ типа Симметрия заданы на боковых (периодических) поверхностях сектора и перед соплом – см. рис.2. Для ускорения процесса сходимости расчета заданы начальные условия внутри параллелепипеда (показан красным на рис.2.), соответствующие входным параметрам на ГУ. На стенках сопла используется пристеночная функция, учитывающая линейный и логарифмические участки в распределении скорости в окрестности стенки, и принимается отсутствие тепловых потерь - установлен нулевой градиент теплового потока.

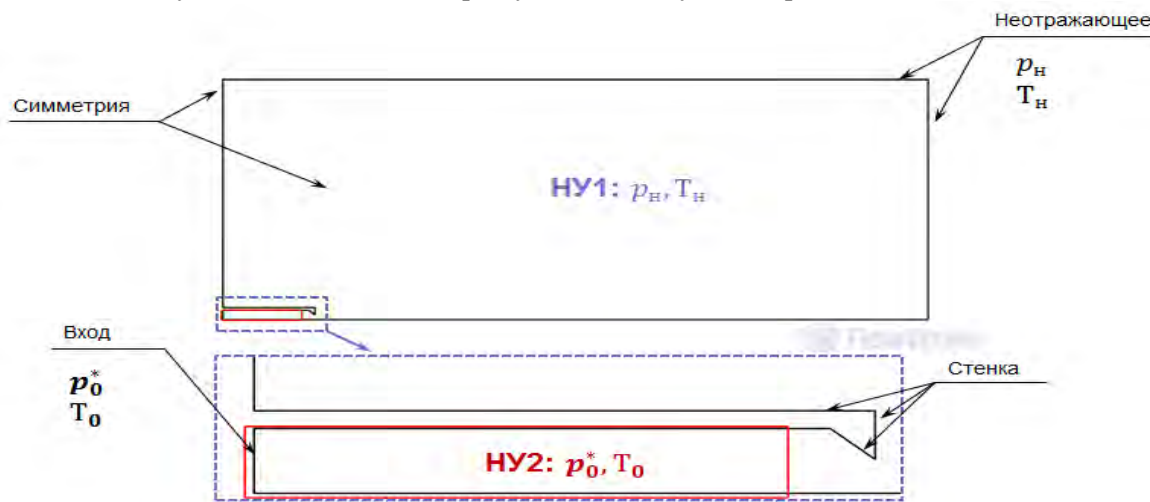


Рис.2 – Граничные и начальные условия

Расчетная сетка

Участникам семинара предлагалось использовать уже созданную расчетную сетку, либо построить свою. Для построения начальной сетки применялся встроенный генератор начальной сетки FlowVision, а для более точного разрешения градиентов переменных в пространстве расчетной области проводилась двумерная адаптация расчетной сетки. Адаптация до 3 уровня проводится по длине сопла и в области распространения струи, далее – по стенкам сопла. Минимальный размер ячеек вблизи внутренних стенок сопла составляет 0,1 мм (при 10-м уровне адаптации). Расчетная сетка показана на рис.3. Данная сетка была выбрана в качестве оптимальной в процессе исследования сходимости по сетке.

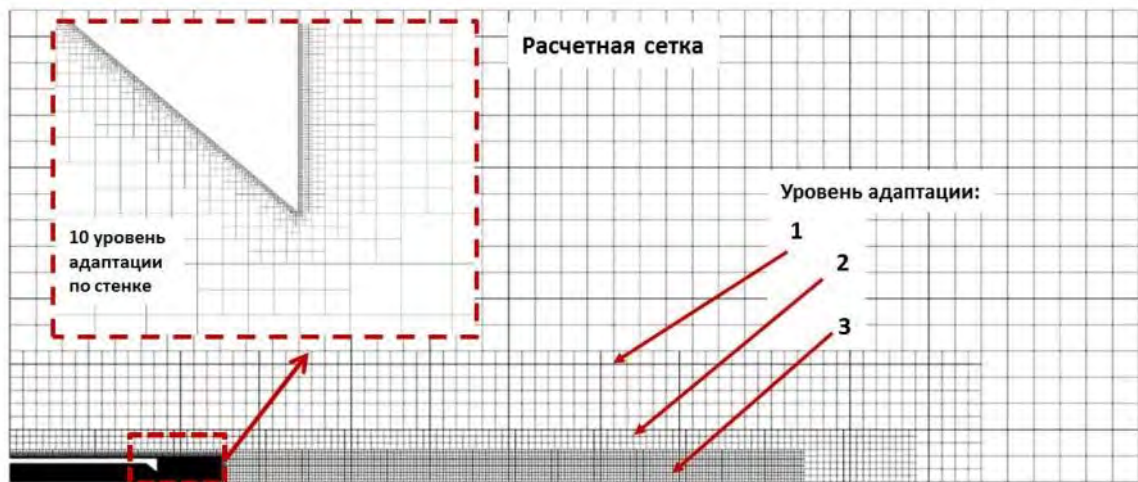


Рис.3 – Расчетная сетка

Параметры расчета и дополнительные настройки

Расчет проводился на версии ПК FlowVision 3.08.05.

Шаг по времени задавался с помощью числа CFL=100 и составлял $\sim 10^{-6}$ сек. на установившемся режиме. Ограничение на первых шагах по времени - $1 \cdot 10^{-4}$ сек.

Схема интегрирования: Неявная (2-й порядок точности).

Градиент давления в пристеночных ячейках: с интерполяцией.

Расчет коэффициентов тяги и расхода сопла

Сравнение с экспериментом в рамках семинара предлагается проводить по коэффициентам расхода и тяги сопла.

Коэффициент тяги сопла является критерием, оценивающим внутренние потери и потери от нерасчетности расширения газа в сопле, и определяется как:

$$C_v = \frac{P_c}{P_{c.ид.}}$$

где P_c - действительная тяга сопла, $P_{c.ид.}$ - идеальная тяга сопла, соответствующая полному расширению газа (давление на срезе сопла равно атмосферному: $p_c = p_H$) и отсутствию внутренних потерь, обусловленных вязкостью реального газа:

$$P_{c.ид.} = G_r C_{c.ад.}$$

где G_r - расход газа через сопло, кг/с; $C_{c.ад.}$ - адиабатная скорость истечения из сопла, м/с.

Расход газа G_r определяется в процессе расчета (или эксперимента) в выходном сечении сопла. Адиабатическая скорость истечения определяется теоретически:

$$C_{c.ад.} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_0^* \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

где T_0^* - абсолютная температура в сопле, К; $\frac{p_c}{p_0^*} = \frac{1}{\pi_{c.расп}}$, $\pi_{c.расп} = NPR$ - располагаемый перепад давления в сопле; p_0^* - давление при входе в сопло, Па; $p_c = p_H$ - давление на срезе сопла, Па.

Действительная тяга сопла определяется по формуле Стечкина:

$$P_c = G_r C_c + S(p_c - p_H),$$

где C_c – реальная скорость истечения из сопла, м/с; p_c – давление на срезе сопла, Па; p_n – давление в окружающей среде, Па; S – площадь среза сопла, м².

Если сопло работает на нерасчетном режиме, то давление на срезе не равно давлению окружающей среды: $p_c \neq p_n$. Тяга сопла за счет скорости истечения, выраженная первым членом суммы в правой части формулы для тяги, определяется интегральной величиной:

$$P_1 = \int_S \rho C^2 dS,$$

где C – локальное значение скорости (в плоскости среза сопла), м/с; ρ – локальное значение плотности газа (в плоскости среза сопла), кг/м³; dS – элемент площади в плоскости среза сопла, м².

Тяга сопла за счет давления представляет собой выражение произведения избыточного давления на площадь сечения среза сопла:

$$P_2 = S(p_c - p_n)$$

Коэффициент расхода сопла определяется как отношение действительного расхода к идеальному расходу при адиабатном истечении, т.е. без трения (обратимый процесс без роста энтропии):

$$C_d = \frac{G_r}{G_{r,\text{идеал.}}}$$

Идеальный расход определяется выражением:

$$G_{r,\text{идеал.}} = \frac{Sp_0^*}{\sqrt{RT_0^*}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_c}{p_0^*} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_c}{p_0^*} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

где $p_c = p_n$.

Расход при адиабатном истечении возрастает с увеличением давления при входе в сопло p_0^* . При достижении критического перепада давления:

$$\pi_{c,\text{кр}} = \frac{2}{k+1} \frac{-k}{k-1}$$

расход достигает максимума, определяемого формулой:

$$G_{r,\text{max}} = \frac{Sp_0^*}{\sqrt{RT_0^*}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}$$

При дальнейшем увеличении $\pi_{c,\text{расп}} > \pi_{c,\text{кр}}$ расход не изменяется. Критическое значение располагаемого перепада давления в сопле зависит только от показателя адиабаты, и для воздуха ($k=1,4$) можно вычислить:

$$\pi_{c,\text{кр}} = \frac{2}{k+1} \frac{-k}{k-1} = 1,893.$$

Критическое значение соответствует установлению в выходном сечении сопла местной скорости звука.

Таким образом, первые три расчетных случая для перепада давления (1,4; 1,6; 1,8) – докритические, идеальный расход определяется выражением, зависящим от перепада. Все последующие расчетные случаи, начиная с перепада $\pi_{c,\text{расп}} = 2,0$ – закритические, сопло работает в режиме недорасширения потока, и идеальный расход сопла (при адиабатном истечении) – максимальный ($G_{r,\text{max}}$).

Результаты расчета

На рис. 4 показано распределение числа Маха для сопла с углом 25° для каждого перепада давления в сопле. Сравнение линий $M=1$ расчетных и экспериментальных данных показывает соответствие расчетов с экспериментом (см. рис.5). Хорошее совпадение ударно-волновой структуры в струе наблюдается при сравнении с экспериментальной теневой картиной (см. рис. 6).

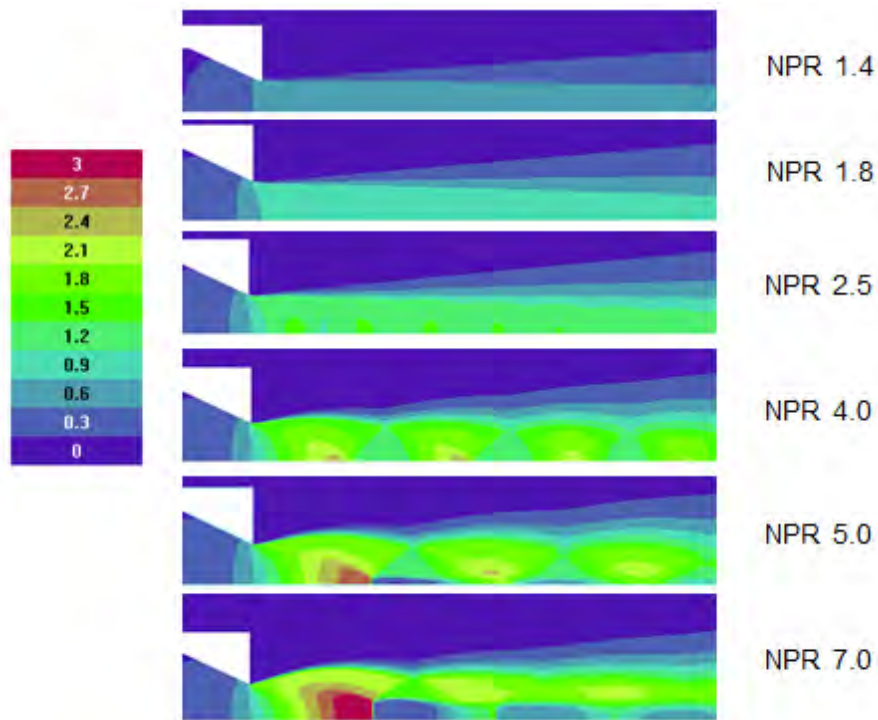


Рис.4 – Распределение числа Маха в струе при изменении NPR. Показано сопло с углом 25°.

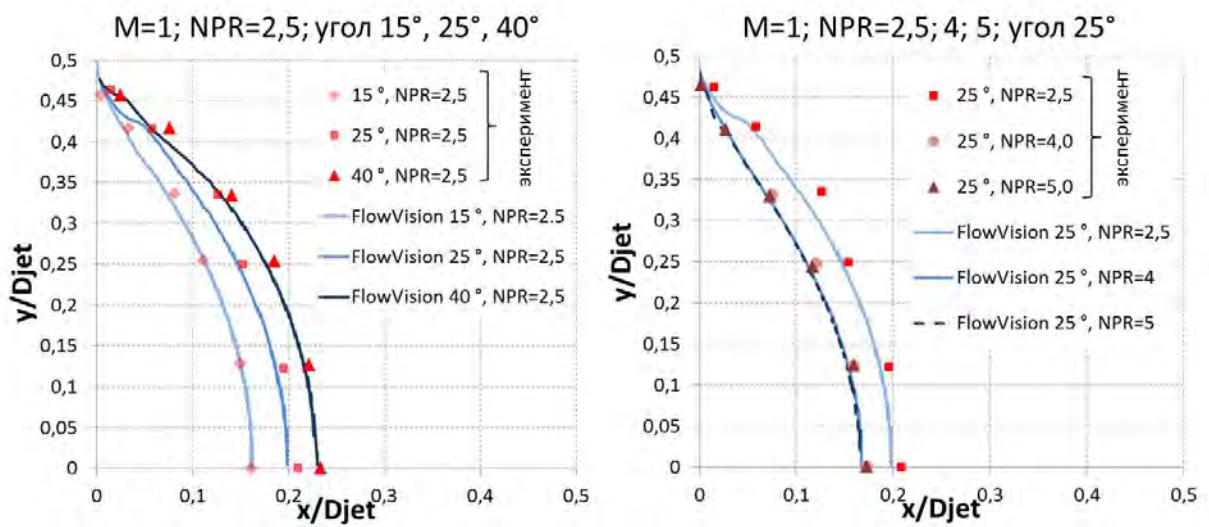


Рис.5 – Линии числа Маха в сравнении с экспериментом

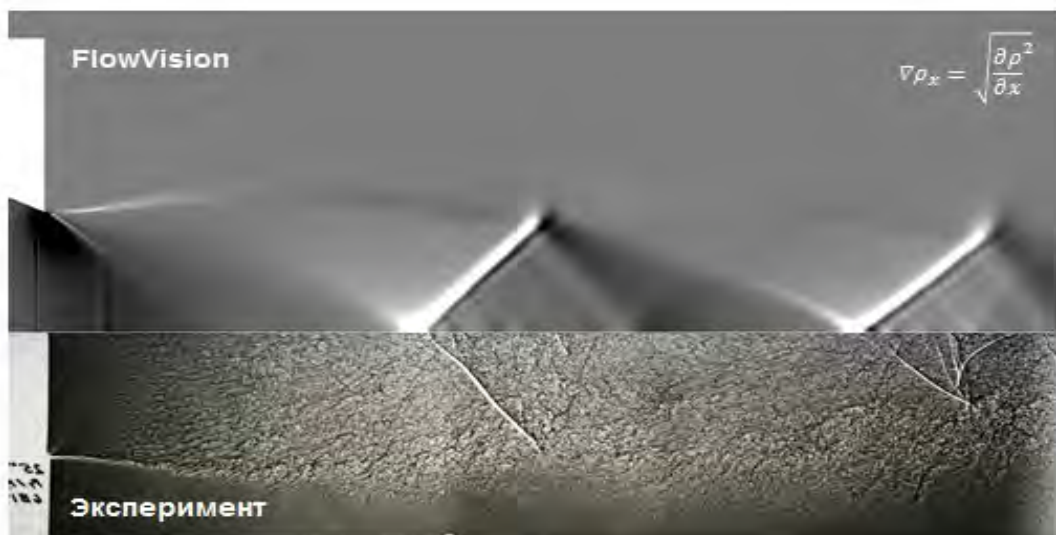


Рис.6 – Теневая картина: скачки уплотнения в струе в сравнении с экспериментом. Сопло 25°, NPR=4.

Коэффициент расхода и тяги сопла в сравнении с экспериментом, аналитическим решением и расчетными данными в других кодах показаны на рис.7-10. Расчетные значения коэффициента расхода хорошо согласуются как с экспериментом, так и с расчетом в других CFD пакетах, например, Ansys Fluent. По коэффициенту тяги сопла FlowVision дает несколько завышенные результаты по сравнению с экспериментом.

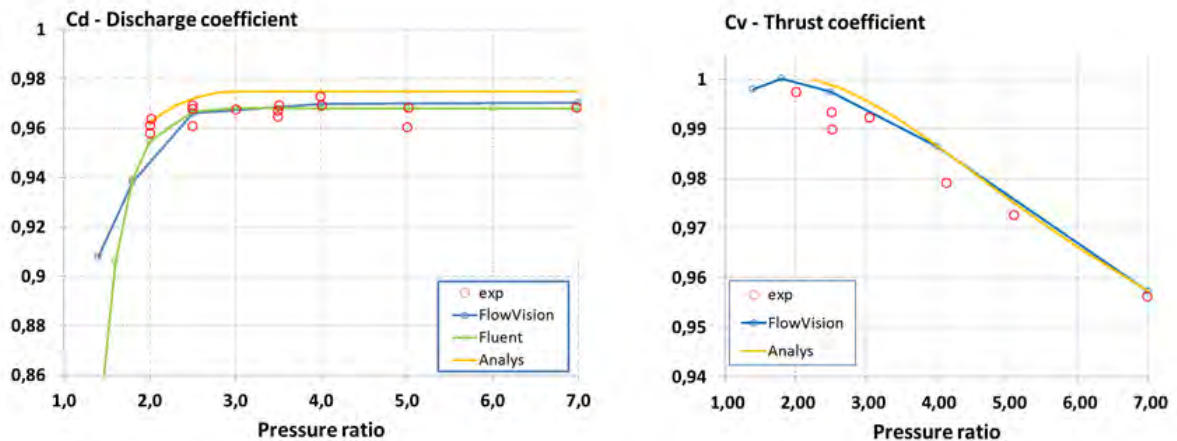


Рис.7 – Коэффициент расхода и тяги сопла с углом 15 град в зависимости от располагаемой степени понижения давления

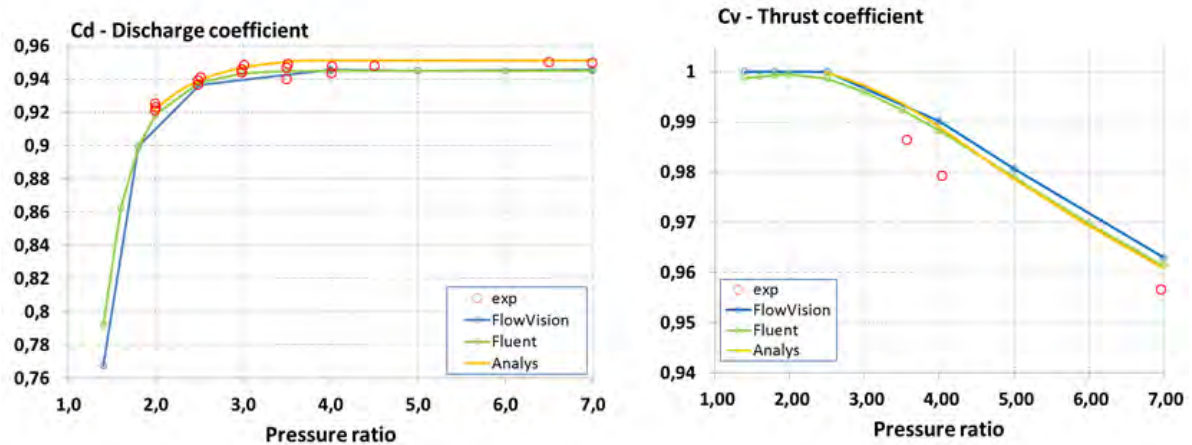


Рис.8 – Коэффициент расхода и тяги сопла с углом 25 град в зависимости от располагаемой степени понижения давления

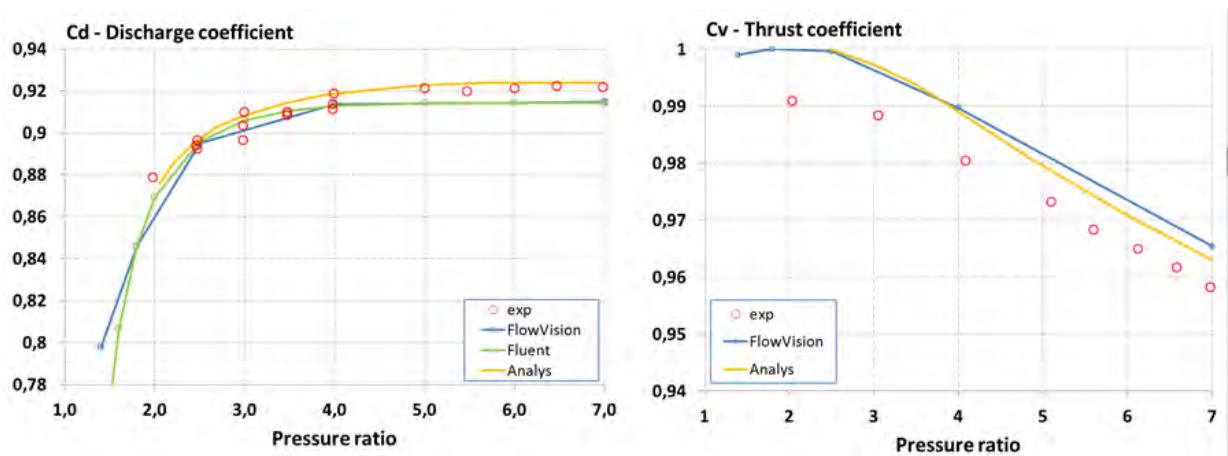


Рис.9 – Коэффициент расхода и тяги сопла с углом 40 град в зависимости от располагаемой степени понижения давления

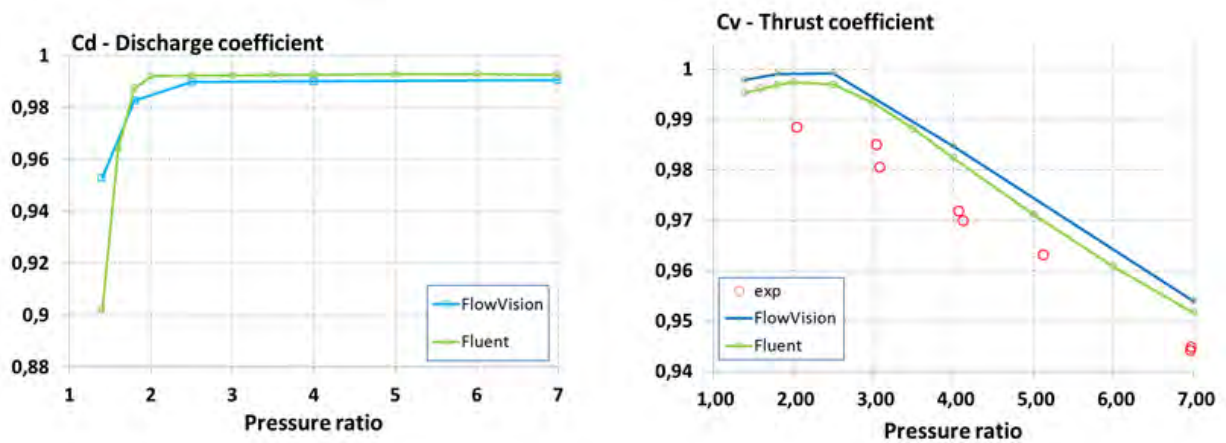


Рис.10 – Коэффициент расхода и тяги профилированного сопла в зависимости от располагаемой степени понижения давления

Выводы

- Решен первый этап из задачи семинара AIAA Propulsion Aerodynamics Workshop.
- Проведено исследование сходимости по сетке, в результате была найдена достаточная для расчетов сетка с минимальным числом ячеек.
- По коэффициенту расхода сопла Cd FlowVision показал хорошие результаты совпадения с экспериментом – погрешность расчетов составила менее 1%.
- По коэффициенту тяги Cv FlowVision показал завышенный по сравнению с экспериментом результат (погрешность более 1,5%). Однако совпадение с аналитическими данными и расчетами Ansys Fluent дают возможность предполагать, что некие данные по проведенному эксперименту или по его обработке оказались за кадром исследования.
- Сравнение теневой картины течения и линий $M=1$ показывает хорошую качественную сходимость с экспериментом.

Список литературы

An Experimental Study of Compressible Flow Through Convergent-Conical Nozzles, Including a Comparison with Theoretical Results, R. L. Thornock & E. F. Brown, Transactions of the ASME Journal of Basic Engineering, pp. 926-932, Dec. 1972.

Wind-US Results for the AIAA 1st Propulsion Aerodynamics Workshop, National Aeronautics and Space Administration (http://aiaapaw.tecplot.com/2012_Workshop/index.html)

Nathan Spotts, Stephen Guzik and Xinfeng Gao «A CFD analysis of compressible flow through convergent-conical nozzles»//AIAA Journal