

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ СПУТНЫХ ДОЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ В ПРОФИЛИРУЕМОМ СОПЛЕ

Т. Ю. Балабина, Я. В. Емельянова, А. А. Уткина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлены результаты численного моделирования по влиянию начальных условий на характер дозвуковых потоков в профилирующем сопле. В основу геометрической модели профилируемого сопла положена модель сопла Витошинского. Численный расчет проводился в параллельном режиме расчетного комплекса «ЛОГОС» модуль «Аэродинамика». Показаны влияния конструктивных решений при построении расчетной сетки.

Введение

Большой практический интерес представляет изучение струйных течений.

Для организации подобного течения служит, так называемый, сопловой аппарат, представляющий, в случае реактивного сопла, специально спрофилированные насадки, которые устанавливаются для преобразования потенциальной энергии протекающего рабочего тела (жидкость, пар или газ) в кинетическую энергию [1]. Они используются в качестве направляющих аппаратов в центробежных и осевых компрессорах, вентиляторах и градириях, аэродинамических трубах. Особенностями применения конфузоров является то, что поток поступает в них из больших объемов [2].

Однако подбор правильного соплового аппарата для получения нужного потока может занять большое количество времени и ресурсов. В этом случае идеальным решением является численное моделирование процесса.

В настоящее время численное моделирование становится неотъемлемой частью в науке и производстве. Безусловно, оно имеет ряд преимуществ, как в изучении какого-либо физического процесса, так и разработки конкретного изделия. Сейчас существует большое количество программных комплексов для решения инженерных задач. Благодаря постоянно возрастающей вычислительной мощности ЭВМ, методов распараллеливания задач, расчет сложных моделей занимает все меньше времени.

Большое количество исследований посвящено изучению струйного течения на срезе сопла, однако, не менее интересным представляется вопрос изучения течения внутри сопла.

Расчетная модель течения

Форма проточной части сопла определяется, в основном, диапазоном изменения степени понижения давления газа («перепадом» давлений) в сопле π_c^* и требованиями к режимам работы двигателя, на которых должна быть получена его максимальная эффективность [3].

При околосубзвуковых и небольших сверхзвуковых π_c^* ($\pi_{c \max}^* < 2,5$), сопла, как правило, выполняются в виде сужающихся или сужающихся с небольшим расширяющимся за критическим сечением участком конических или профилированных каналов. Геометрия канала сопла неизменна и оптимизируется в зависимости от полетного цикла, чаще всего для крейсерского режима. Такие сопла называются нерегулируемыми или «жесткими».

Сужающиеся сопла могут иметь вид профилированного канала, образованного вращением кривой, описываемой формулой Витошинского [3]:

$$Y_X = \frac{R_{вх} R_{кр}}{\sqrt{R_{вх}^2 - \frac{BS(1-BT)^2}{\left(1 + \frac{1}{3}BT\right)^3}}},$$

где $BS = R_{вх}^2 - R_{кр}^2$, $BT = (X/L_c)^2$; $R_{вх}$ – радиус на входе в сопло; $R_{кр}$ – радиус сопла в критическом сечении; L_c – длина сопла; X , Y_X – текущие координаты точек, лежащих на образующей, начиная от входа в сопло.

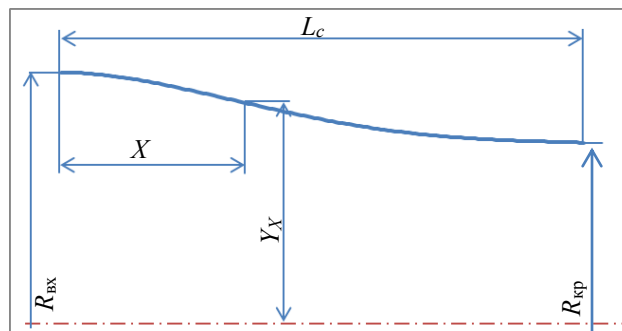


Рис. 1. Профиль сопла Витошинского

На рис. 1 представлено схематическое построение профилирующего сопла. На основании выше представленной схемы профиля была построена трехмерная модель расчетной области, представленная на рис. 2, которая в дальнейшем будет использоваться для генерации расчетных сеток.

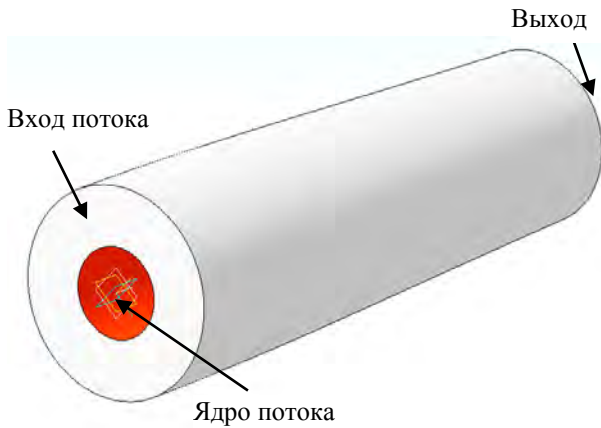


Рис. 2. Геометрия расчетной области

Для проведения расчетов использовалась блочно-структурированная сетка.

Численный расчет проводился в комплексе «ЛОГОС» модуль «Аэродинамика» методом нестационарного моделирования турбулентных течений [4].

Расчет конвективных потоков производился схемой с гибридной диссипацией. Преимущества данной схемы состоит в том, что она предоставляет баланс между точностью и устойчивостью: в области гладкого решения поток будет рассчитываться с использованием низко-диссипативной симметричной схемы, в области скачков, разрывов и в пограничном слое используется стандартная противопоточная формулировка.

Использована вихреразрешающая модель на основе модели турбулентности Спаларта–Алмарса (SA). Особенность этой модели в том, что она сочетает в себе подходы RANS (модели основанные на усредненных по Рейнольдсу уравнении Навье–Стокса) и LES (модели, основанные на методе моделирования крупных вихрей). В областях потока, где размер вычислительной сетки Δ достаточен для разрешения энергонесущих вихрей, т. е. при $\Delta < L_t$ применяется метод LES, а в остальной области – RANS. Таким образом, в DES, основанной на модели турбулентности Спалмарта–Алмараса SA, в качестве характерного линейного масштаба турбулентности используется расстояние до стенки d . При моделировании отсоединенных вихрей этот масштаб заменяется функцией

$$\tilde{d} = \min(d, C_{DES}\Delta),$$

где C_{DES} – эмпирическая константа, а Δ определяется как максимальный из трех размеров контрольного объема $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$. Таким образом, в пограничных слоях работают RANS модели, а в остальной области – LES [5].

Основные показатели системы: компоненты скорости, температуры, давления, энергии, плотности, концентрации, параметры модели турбулентности рассчитывались методом наименьших квадратов.

Методы расчетов ограничений градиентов полей применялся ограничитель Венкатакришнана. Ограничитель вводится для предотвращения возникновения нежелательных осцилляций в решении. Цель ограничителя состоит в уменьшении величины градиентов по каждому из направлений (т. е. $\frac{U_{I+1} - U_I}{h}$), используемых для интерполяции U на грани ячейки расчетной сетки, для ограничения вариаций решения. При наличии сильных разрывов, ограничитель обнуляет величины градиентов с целью предотвращения возникновения новых экстремумов. Проще говоря, ограничитель сохраняет второй порядок точности по пространству в области гладкого решения и переключает схему на первый порядок точности в области разрыва [6].

Данный ограничитель примечателен тем, что он показывает хорошие результаты в расчетах как на структурированных, так и на неструктурированных сетках.

Результаты расчетов

При моделировании сопла, расчеты производились по нескольким вариантам значений потоков:

- скорость в ядре потока в 2 раза меньше основной скорости,
- скорость в ядре потока на 9 % меньше основной скорости.

Случай, когда скорость в основном потоке была в два раза меньше основной скорости, показал, что течение внутри сопла имеет ламинарную зону перемешивания и характерное турбулентное течение. Во втором случае была получена ламинарная диффузия на протяжении всего отсчитанного времени.

Было принято решение сформировать несколько новых расчетных моделей:

1. Добавлено 0,5 метра цилиндрической трубы к выходному отверстию сопла.
2. Добавлено 0,5 метра цилиндрической трубы к входному и выходному отверстию.
3. Добавлено 0,5 метра цилиндрической трубы к входному отверстию, а к выходному отверстию сопла добавлялась цилиндрическая труба длиной свыше 20 калибров.

Необходимость построения новых моделей была обусловлена тем, что в процессе счета было выявлено влияние граничных условий на поток.

Стоит также отметить, что в рамках просчитанных вариантов характерные поведения потоков не сильно отличались друг от друга.

Дальнейшее обсуждение результатов будет касаться только модели с последним указанным дополнением.

Для данной модели были проведены дополнительные расчеты:

- скорость в ядре потока на 20 % меньше основной скорости,
- скорость в ядре потока на 27,5 % меньше основной скорости,
- скорость в ядре потока на 30 % меньше основной скорости,

- скорость в ядре потока на 35 % меньше основной скорости,
- скорость в ядре потока на 40 % меньше основной скорости.

На рис. 3–9 представлены результаты распределение паров металла в сопловом аппарате в моменты времени $t = 0,0105$ с и $t = 0,0255$ с.

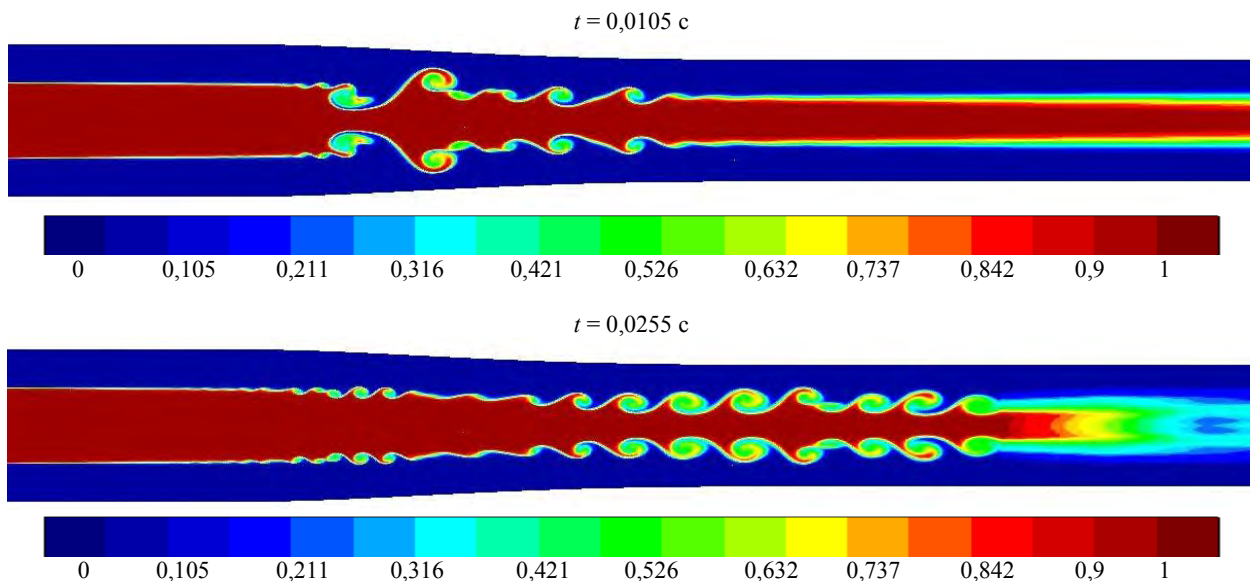


Рис. 3. Распределение паров металла в сопловом аппарате, вариант – скорость в ядре потока в 2 раза меньше основной скорости

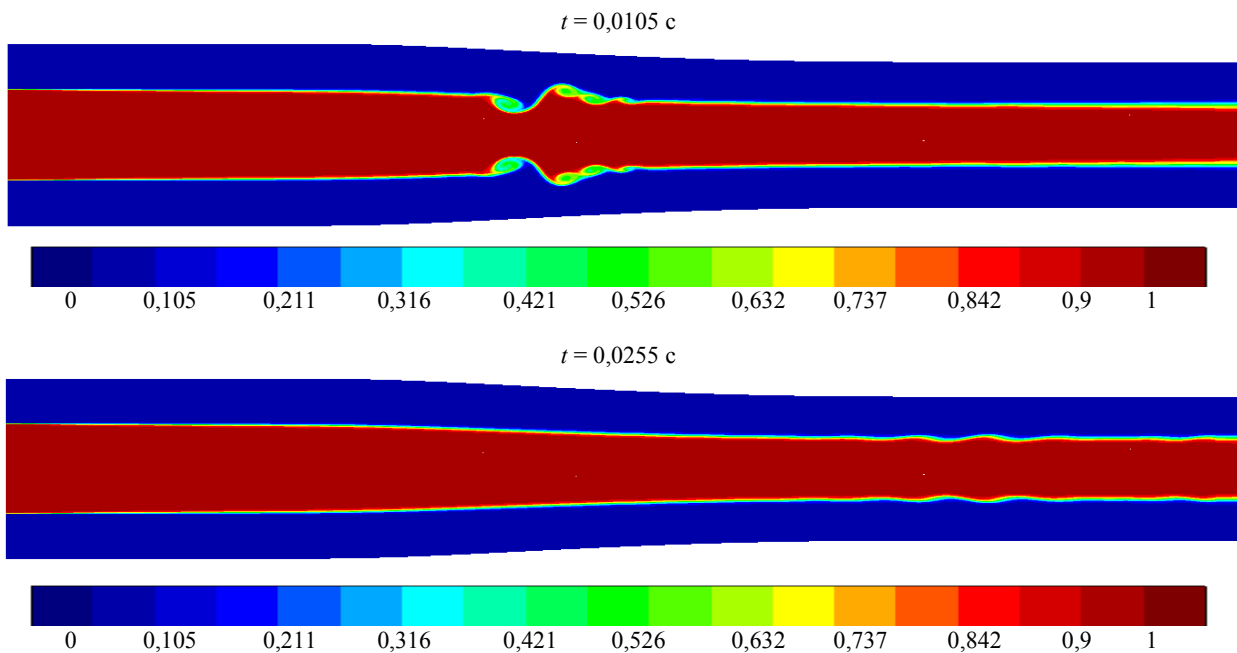
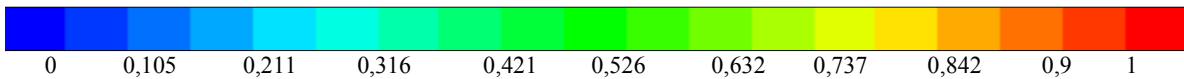
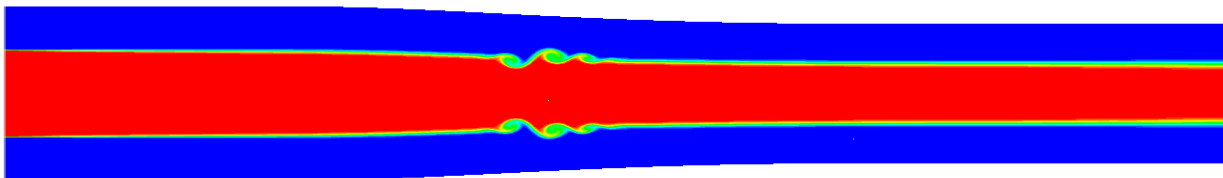


Рис. 4. Распределение паров металла в сопловом аппарате, вариант – скорость в ядре потока на 40 % меньше основной скорости

$t = 0,0105 \text{ c}$



$t = 0,0255 \text{ c}$

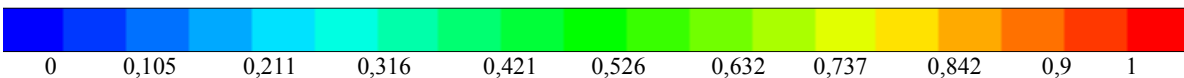
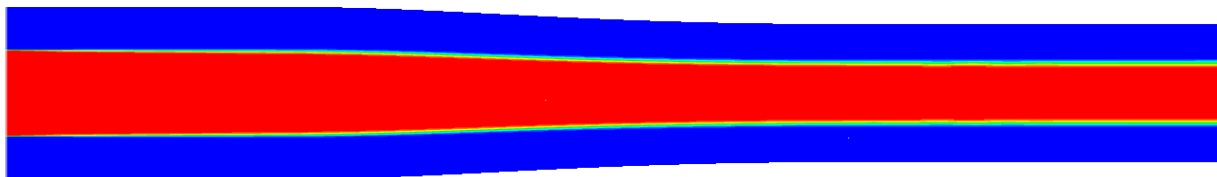
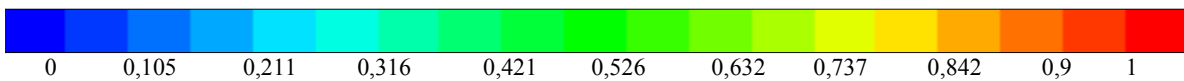
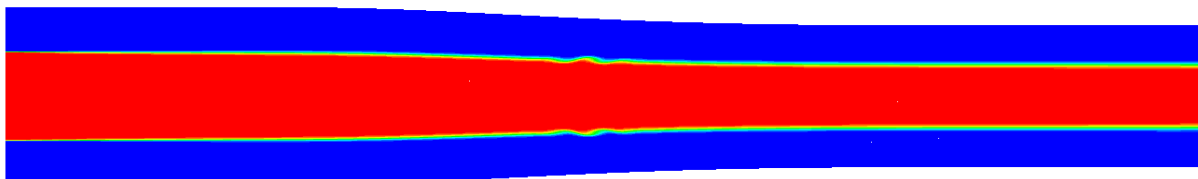


Рис. 5. Распределение паров металла в сопловом аппарате, вариант – скорость в ядре потока на 35 % меньше основной скорости

$t = 0,0105 \text{ c}$



$t = 0,0255 \text{ c}$

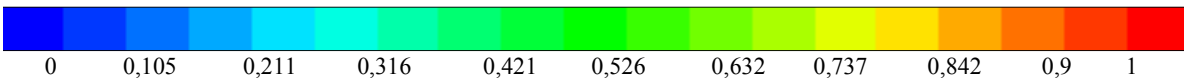
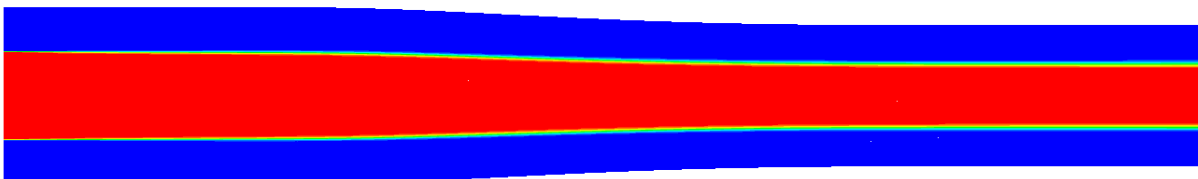
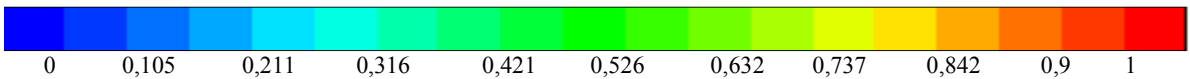
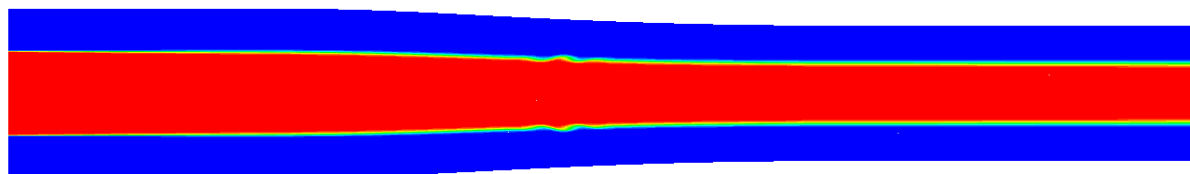


Рис. 6. Распределение паров металла в сопловом аппарате, вариант – скорость в ядре потока на 30 % меньше основной скорости

$t = 0,0105 \text{ c}$



$t = 0,0255 \text{ c}$

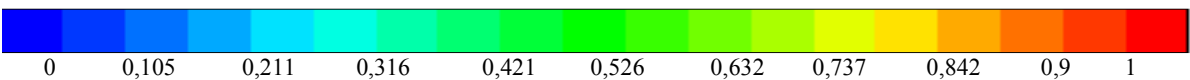
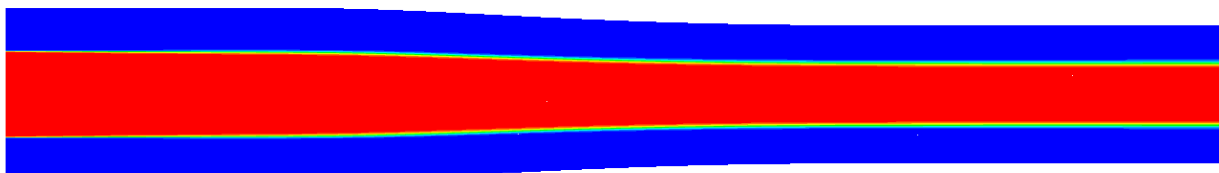
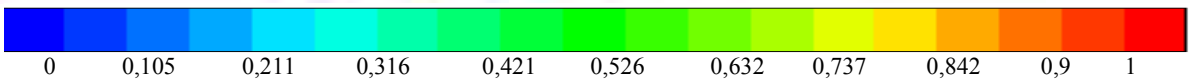
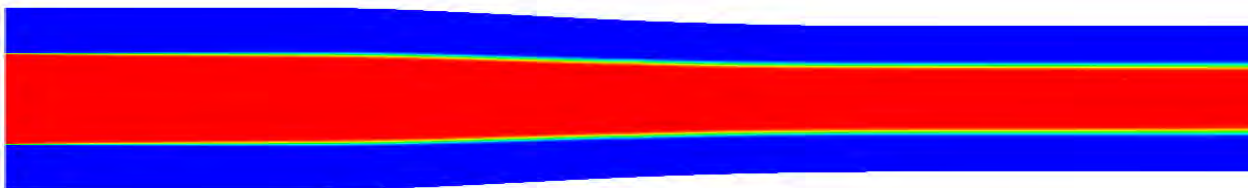


Рис. 7. Распределение паров металла в сопловом аппарате, вариант – скорость в ядре потока на 27,5 % меньше основной скорости

$t = 0,0105 \text{ c}$



$t = 0,0255 \text{ c}$

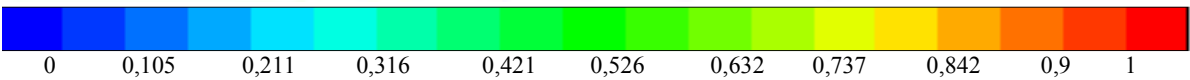
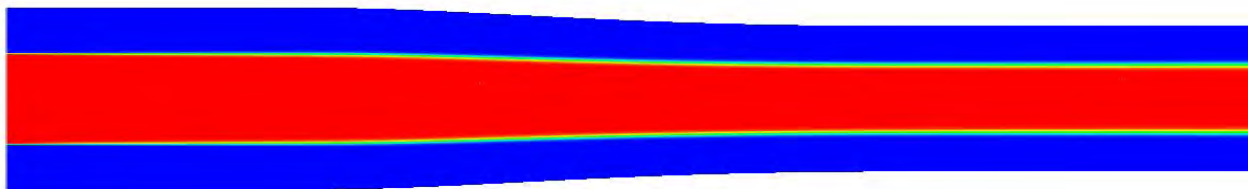
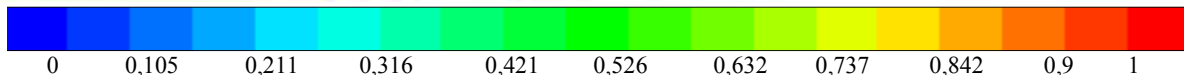
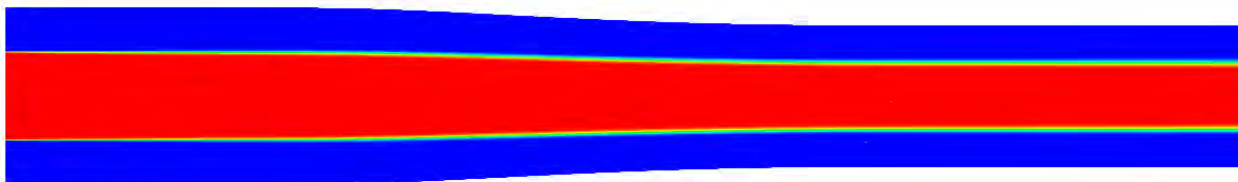


Рис. 8. Распределение паров металла в сопловом аппарате, вариант – скорость в ядре потока на 20 % меньше основной скорости

$t = 0,0105 \text{ с}$



$t = 0,0255 \text{ с}$

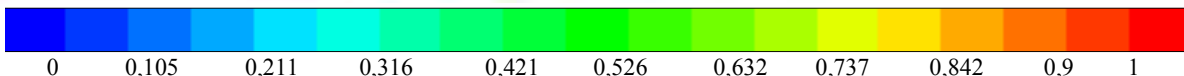
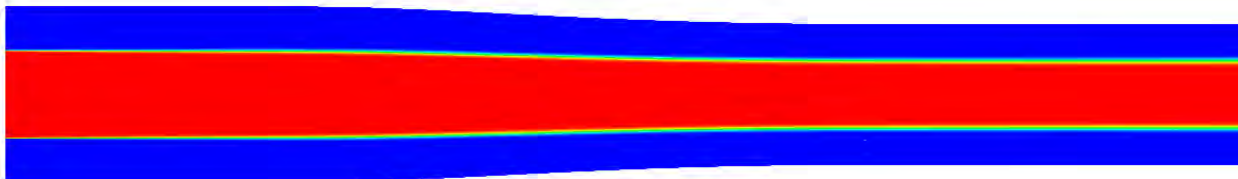


Рис. 9. Распределение паров металла в сопловом аппарате, вариант – скорость в ядре потока на 9 % меньше основной скорости

Из выше приведенных результатов видно:

в вариантах расчетов, где значения скоростей основного потока составляли 50 % и 40 % от скорости обдувного контура, наблюдаются турбулентные всплески потока на протяжении всего расчетного времени;

в вариантах расчетов, где значения скоростей основного потока составляли с 35 % до 27,5 % от скорости обдувного контура, наблюдается неустойчивость потока лишь в первом промежутке времени ($t = 0,01 \text{ с}$);

в вариантах расчетов, где значения скоростей основного потока составляли 20 % и 9 % от скорости обдувного контура, наблюдается ламинарная диффузия на протяжении всего расчетного времени.

Заключение

На основе программного комплекса «ЛОГОС» проведено численное 3D моделирование течения газовой среды в перспективном варианте соплового аппарата. Полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Показано, что в предложенном варианте конструкции потоки чистого газа и рабочего газа, содержащего пары щелочных металлов, практически не перемешиваются, что иллюстрируется расчетным распределением концентрации паров щелочного металла в объеме газодинамического тракта.

2. Показано, что течение является устойчивым.

Литература

1. Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // Теплофизика и аэромеханика. 2008 Т. 15, № 1. С. 59–73.
2. Шустова М. Л. Ускорение потока как фактор влияния на кинематические характеристики течения // Вестник Казанского технологического университета выпуск. 2013 Т. 6, № 5. С. 223–225.
3. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008.
4. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Полищук С. Н., Лашкин С. В., Жучков Р. Н., Глазунов В. А., Яцевич С. В., Курулин В. В. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса. Препринт № 111. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, 67 с.
5. Сентябов А. В., Гаврилов А. А., Дектярев А. А. Исследование моделей турбулентности для расчета закрученных течений // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 81–93.
6. Денисенко В. В. Прямое численное моделирование вихрей в потоках нормальной идеальной среды. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2015.
[http://www.keldysh.ru/council/3/D00202403/denisenko_diss.pdf]