

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗАКРУЧЕННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОДНОКОМПОНЕНТНОГО ПОТОКА РАБОЧЕГО ТЕЛА В ТРАНС- И СВЕРХЗВУКОВОЙ ОБЛАСТЯХ СОПЕЛ ЛАВАЛЯ**

© 2009 В. В. Рыжков, И. И. Морозов

Самарский государственный аэрокосмический университет

С использованием математической модели пространственного (закрученного) вязкого (турбулентного) течения однокомпонентного рабочего тела в транс- и сверхзвуковой областях на основе системы уравнений Навье-Стокса и программного обеспечения вычислительных комплексов Star-CD, ANSYS CFX и Fluent получено распределение газодинамических параметров в трактах ракетных двигателей и определены некоторые закономерности такого типа течений.

Сопло Лавалья, транс- и сверхзвуковая область течения, параметр закрутки, способ организации закрученного течения, газодинамические параметры, звуковая поверхность, закономерности течения

В настоящее время жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) и жидкостные ракетные двигатели малой тяги (ЖРДМТ) достигли определенного уровня совершенства и дальнейший рост их эффективности (повышение характеристик) невозможен без применения различных средств интенсификации рабочего процесса, протекающего в камерах сгорания, в частности, турбулентного горения, что оказывает влияние на течение продуктов сгорания в соплах Лавалья.

Достаточно полно и системно процессы в соплах ракетных двигателей рассмотрены в предположении идеального рабочего тела [1]. Реальность параметров оценивается посредством коррекции идеальных величин с помощью коэффициентов, учитывающих особенности процессов.

В настоящее время разработаны методы решения прямой и обратной задачи теории сопла; рассмотрены существенные особенности течений газа в соплах ракетных двигателей, МГД-генераторов, ГДЛ, соплах специальных форм; созданы современные способы профилирования сопел; получены основные результаты [2-4].

Разработка компьютерных методов и средств для расчета пространственных турбулентных многокомпонентных химически-реагирующих потоков рабочего тела в трактах ракетных двигателей с целью повышения их энергетических параметров и надежности, является актуальной задачей, позволяющей, в том числе, при создании двигателей нового поколения повысить ин-

формативность и качество начальных этапов разработки, сократить период дорогостоящей экспериментальной отработки ЖРД (ЖРДМТ), что повлечет снижение финансовых затрат и сроков создания двигателя в целом.

Для целей интенсификации внутрикамерных процессов часто используются закрученные течения, которые по своей газодинамической природе существенно отличаются от незакрученных потоков. В связи с этим, они выделены в отдельный класс течений. Основные результаты по закрученным потокам получены в [5-9]. Однако, рассмотрение течения в до-, транс- и сверхзвуковой областях с единых позиций до настоящего времени отсутствует.

В связи с появлением мощных вычислительных систем и программного обеспечения, основанного на решении уравнений Навье-Стокса, различных моделей турбулентности и горения, представляется возможным решение задачи расчета газодинамических параметров течения закрученного потока в указанных областях на новой современной базе.

На первом этапе представляет интерес рассмотрение закрученного турбулентного потока однокомпонентного рабочего тела, в трактах ракетных двигателей.

### **Краткая характеристика модели, численного метода и варьируемых факторов**

В работе представлены результаты иллюстрирующие распределение локальных параметров закрученного турбулентного по-

тока рабочего тела однородного химического состава в транс- и сверхзвуковой области сопла Лавалья, полученные с использованием математической модели на основе уравнений Навье-Стокса [10-12]. Для моделирования турбулентности применена модель напряжений Рейнольдса, к которым относится RSM – модель, потенциально позволяющая более точно описывать сложные пространственные течения, чем модели турбулентной вязкости ( $k - \varepsilon$  и  $k - \omega$ ).

Система уравнений решалась методом конечных элементов.

Расчетная область объекта исследования представляет собой сектор сопла Лавалья, геометрия которого показана на рис. 1.

В работе расчетная область разбивается на 100 тыс. конечных объемных элементов. Эта величина является компромиссом между располагаемыми компьютерными ресурсами и погрешностью численного метода.

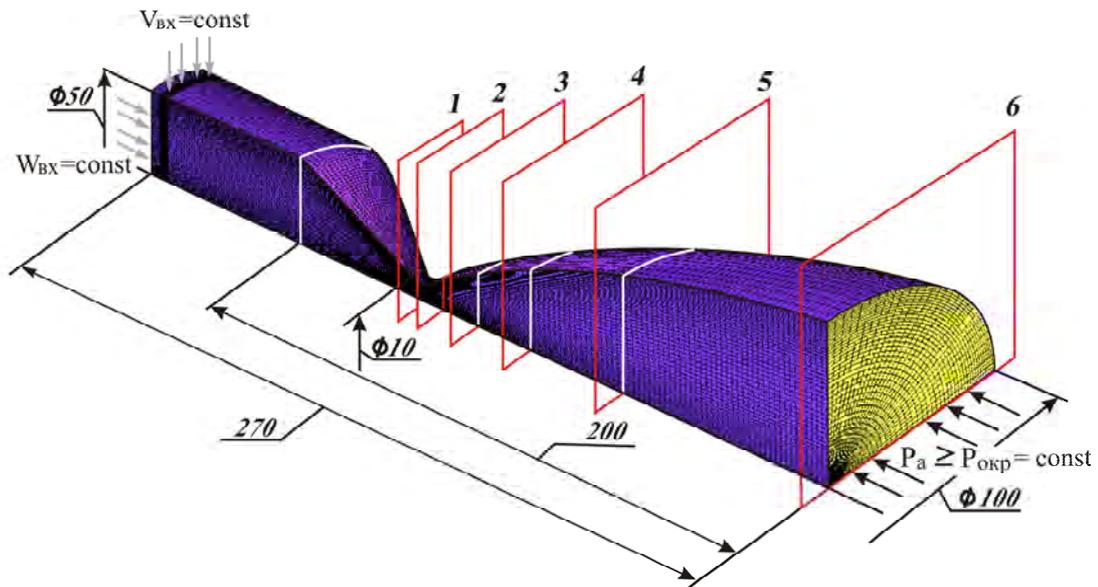


Рис. 1. Схема расчетной области и конечно-элементного разбиения объекта исследования

Принятые граничные условия соответствуют: на входе в область –  $V_{bx} = \text{const}$ , ( $W_{bx} = \text{const}$ ), на выходе –  $p_a \geq p_{окр} = \text{const}$ .

На схеме отмечены характерные сечения газодинамического тракта сопла соответствующие геометрическим степеням расширения –  $\bar{F}_{с.} = 1,0; 2,0; 5,0; 25; 50; 100$ , в которых далее выводятся и обсуждаются результаты.

В процессе расчетных исследований варьировались следующие наиболее важные физические параметры: интенсивность вращения потока (параметр закрутки), способ организации закрученного течения (характер распределения окружной составляющей скорости по радиусу входного сечения газодинамического тракта), геометрия сопла Лавалья.

В работе интенсивность вращения потока газа определялась с помощью параметра

$S$  [7], который представляет собой безразмерное отношение:

$$S = \frac{\int_0^r \rho V W r^2 dr}{\int_0^r \rho W^2 r dr}$$

где  $\rho$  – плотность потока;  $V$ ,  $W$  – окружная и осевая компоненты скорости.

Организация различного типа закрученного течения обеспечивалась распределением окружной составляющей скорости в поперечном сечении входного устройства. Использовались: «потенциальный» закон, закон «твердого тела», закон «равномерного» распределения, закон «комбинированного» распределения, которыми моделировались реальные генераторы закрученных потоков: с помощью вращающейся торцевой стенки, посредством направляющих лопаток и тангенциальным подводом газа.

Основной объем результатов получен на схеме с тангенциальным подводом газа, для анализа которых в транс- и сверхзвуковой областях сопла необходимо учитывать, что они получены при сквозном счете всего тракта сопла, включая камеру.

В предложенной конфигурации, математическая модель позволяет определять распределение локальных газодинамических параметров (скорости и ее составляющих, давления, плотности, температуры, концентрации, динамической вязкости, энергии турбулентного движения рабочего тела в пределах расчетной области, а также интегральных: параметра закрутки, импульса, момента импульса, расхода, удельного импульса тяги и некоторых других.

Изменение из некоторых интегральных величин вдоль сопла использовалось как дополнительных критерий оценки правильности произведенных расчетов газодинамических параметров.

### Результаты расчета газодинамических параметров в трансзвуковой области сопла Лавалея

Распределение газодинамических параметров в минимальном сечении сопла Лавалея (критическом сечении для одномерного потока газа) и прилегающих областях отражает предысторию течения, определяет расходные характеристики сопла и формирует течение в его сверхзвуковой части.

В работе исследуется влияние на закрученное течение в трансзвуковой области сопла параметра закрутки и способа организации закрученного потока газа.

На рис. 2 приведено распределение компонент скорости по радиусу начального сечения дозвуковой части сопла при фиксированном параметре  $S$  и тангенциальной подаче газа во входном устройстве.

Отметим высокую степень неравномерности закрученного потока газа на входе в конфузурную часть сопла (эпюры полной и составляющих скорости газа). Наибольшие градиенты скорости реализуются, в основном, в окрестности оси течения (области проекции минимального сечения на плоскость начального сечения сопла). Уровень осевой и окружной составляющих скорости примерно одинаков, а радиальной – пренеб-

режительно мал. Рассогласование скоростей в периферийной и центральной частях потока существенно и достигает величины порядка  $\Delta V \sim 100$  м/с.

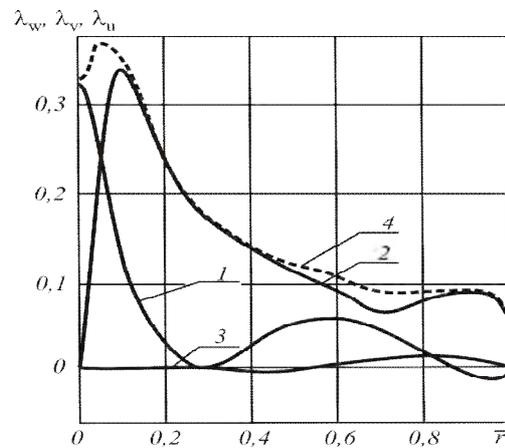


Рис. 2. Распределение осевой (1), окружной (2), радиальной (3), полной (4) составляющих скорости по радиусу входного сечения сопла;  $S = 3,4$ ; подача газа – тангенциальная

Распределение осевой компоненты скорости закрученного течения в минимальном сечении сопла Лавалея ( $\bar{F}_c = 1$ ) при различных способах организации закрученного течения, и различных уровнях параметра закрутки при тангенциальной подаче газа представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

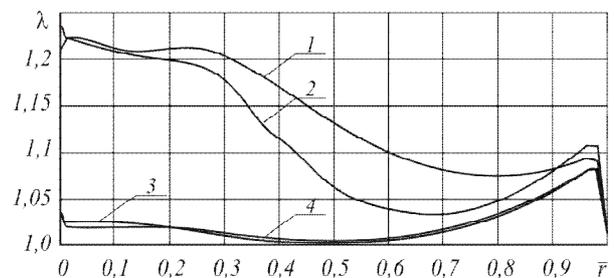
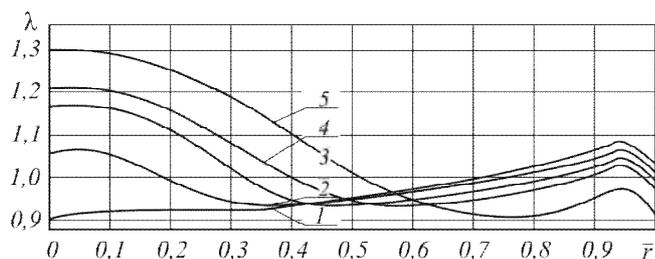


Рис.3. Распределение осевой составляющей скорости по радиусу сопла в сечении ( $F_c = 1$ ) при различных способах организации закрученного потока,  $S = 3,4$ : 1 – «комбинированный» закон; 2 – «потенциальный» закон; 3 – закон «равномерного» распределения; 4 – закон распределения по «твердому телу»

Конфузурная часть сопла Лавалея деформирует закрученное течение как показывают эпюры полной, осевой и окружной составляющих скорости потока. Сравнение осевой компоненты скорости –  $W$  на рисунке 2 (вход в сопло) и соответствующих кривых 1 (рис. 3) и 3 (рис. 4) показывает, что наряду с приосевой областью течения мак-

симумы скорости возникают также и в пристенной зоне.



1 -  $S=0$ ; 2 -  $S=1,8$ ; 3 -  $S=3,4$ ; 4 -  $S=4,4$ ; 5 -  $S=7,6$

Рис. 4. Распределение осевой составляющей скорости по радиусу сопла в сечении  $\bar{r}_c = 1$  при различных уровнях закрутки потока; «комбинированный» закон распределения окружной скорости

Причем, уровни  $W_{\max}$  при умеренных параметрах закрутки  $S \leq 3,4$  соизмеримы. Однако, при дальнейшем увеличении  $S > 3,4$  наблюдается опережающий рост осевой составляющей скорости в центральной области течения.

Исключением их этой схемы является закрученные потоки газа, организованные по закону «твёрдого тела». Для таких потоков в минимальном сечении сопла Лавале максимум  $W$  устойчиво смещается в пристенную зону.

Важнейшей особенностью закрученных течений, организованных различным способом и при практически любых отличных от нуля (осевых течениях) параметрах закрутки, в минимальном сечении сопла Лавале реализуется сверхзвуковое течение газа, в некоторых областях даже по осевой компоненте скорости. Эта тенденция усиливается с ростом интенсивности вращения для любого типа закрученных течений. Сказанное отражено на рис. 5 и 6, на которых представлены форма и положение звуковой поверхности ( $\lambda = 1$ ) в трансзвуковой области сопла Лавале в зависимости от способа организации закрученного течения и параметра закрутки в исследованном диапазоне его изменения.

Показано, что звуковая поверхность для осевого потока имеет классическую параболическую форму обращенную выпуклой частью по направлению потока рабочего тела. Закрученный поток газа имеет более сложную форму звуковой поверхности, которая с увеличением параметра закрутки трансформируется в зонтообразную, пересе-

кающую плоскость минимального сечения сопла, и обращается выпуклой частью против направления потока (рис. 6).

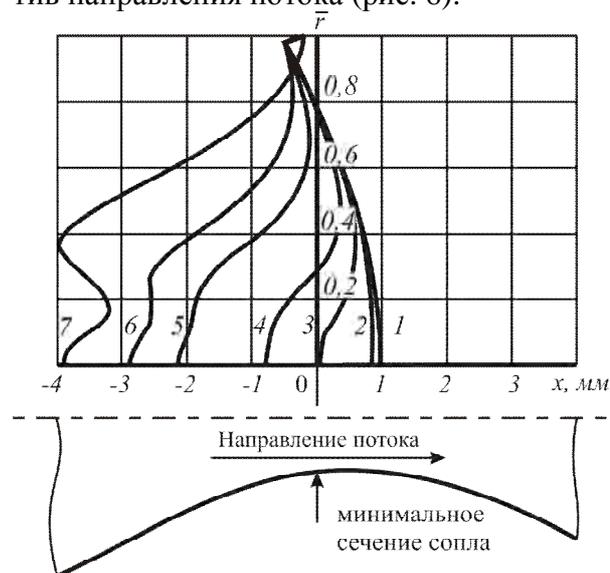


Рис. 5. Влияние параметра закрутки на форму звуковой поверхности в трансзвуковой области сопла, подача газа – тангенциальная:

1 -  $S=0$ ; 2 -  $S=0,4$ ; 3 -  $S=0,9$ ; 4 -  $S=1,8$ ;

5 -  $S=3,4$ ; 6 -  $S=4,4$ ; 7 -  $S=7,6$

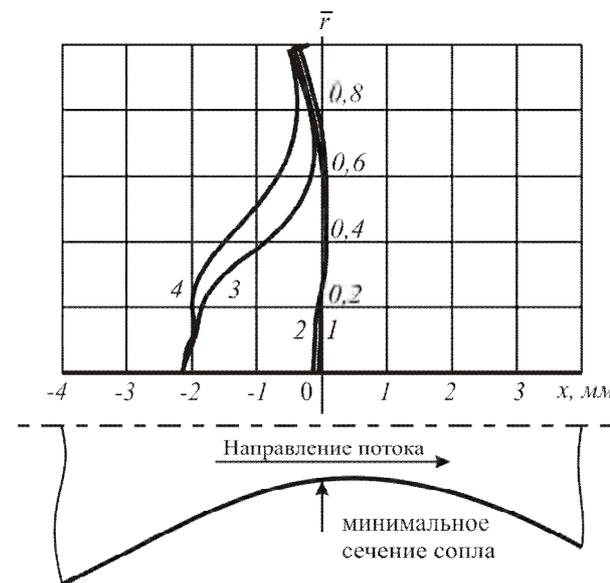


Рис. 6. Форма и расположение звуковой поверхности для различных способов организации закрученного потока,  $S = 3,4$ :

1 – закон распределения по «твёрдому» телу;

2 – закон «равномерного» распределения;

3 – распределение по «потенциальному» закону;

4 – распределение по «комбинированному» закону

При фиксированном параметре  $S$  наиболее подвержена искажению и перемещению от минимального сечения звуковая поверхность течения, организованного с ис-

пользованием «комбинированного» закона распределения окружной составляющей скорости (генератором течений с тангенциальным входом). Зарегистрировано смещение звуковой поверхности при течении закрученного потока рабочего тела в конфузурную часть сопла Лавала по осевой координате порядка 2,0 мм при  $S \sim 3,4$ .

Особенности течения закрученного потока рабочего тела в трансзвуковой области сопла Лавала существенно влияют на расходные характеристики сопла (коэффициент расхода), являющиеся важнейшими для ракетных двигателей.

На рис. 7 представлены расчетная и экспериментальная зависимости относительного коэффициента расхода сопла  $\mu_c$  (отношение коэффициента расхода сопла закрученного и незакрученного потоков при прочих равных условиях) от параметра закрутки потока.

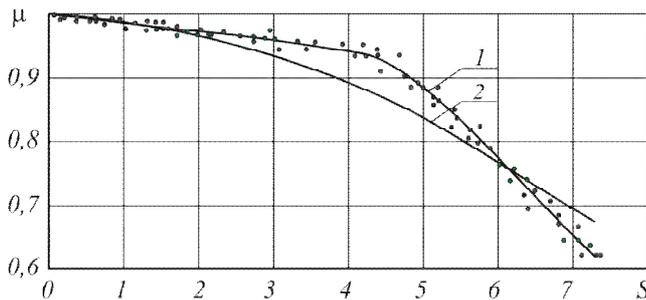


Рис. 7. Расходная характеристика сопла Лавала: 1 — эксперимент; 2 — расчет

Отметим известную из литературы тенденцию — снижение  $\mu_c$  с увеличением параметра  $S$ . В работе получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов.

Для объяснения протекания характеристики  $\mu_c \geq f(S)$  необходимо исходить из следующих представлений о влиянии вращения газа в сопле на расходные характеристики. Величина расхода через минимальное сечение сопла Лавала определяется как интеграл по сечению произведения осевой составляющей скорости на плотность в каждой трубке тока. С увеличением параметра закрутки осевая составляющая скорости растет в основной части сечения и может достигать, как показано выше, сверхзвуковых значений. Плотность газа, как известно, падает в соот-

ветствии с ростом полной скорости (включая окружную, которая также увеличивается с ростом  $S$ ). Поэтому несмотря на увеличение аксиальной скорости расход рабочего тела интегрально снижается из-за более резкого (опережающего) уменьшения плотности в закрученном течении.

Сказанное можно проиллюстрировать результатами, представленными на рис. 8, где показаны эпюры расходонапряженности в минимальном сечении сопла для закрученного и незакрученного потоков газа.

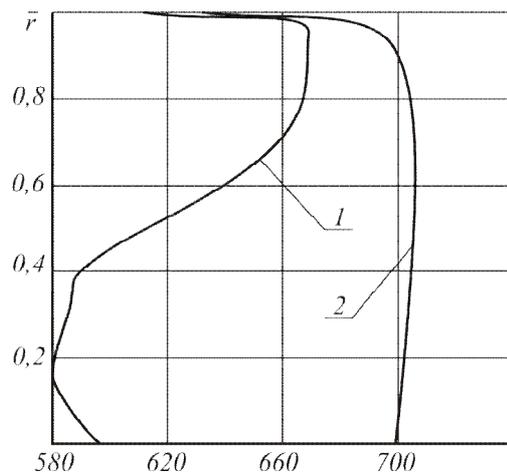


Рис. 8. Распределение расходонапряженности в минимальном сечении сопла Лавала для закрученного (1) и незакрученного (2) потоков

Очевидно, для потока без закрутки расходонапряженность распределена практически равномерно по поперечному сечению, в то время как для закрученного потока расходонапряженность имеет характерный провал в центральной части потока. Это приводит к тому, что только незначительная часть потока протекает в приосевой области поперечного сечения, а основная часть — в пристеночной области.

Такому распределению массы газа способствует и перераспределение полного давления по поперечному сечению сопла, характерное для закрученного сечения газа. В минимальном сечении сопла эпюра полного давления представлена на рис. 9.

Данные на рис. 8, 9 получены при условии равенства полного давления на стенке модельной камеры сгорания.

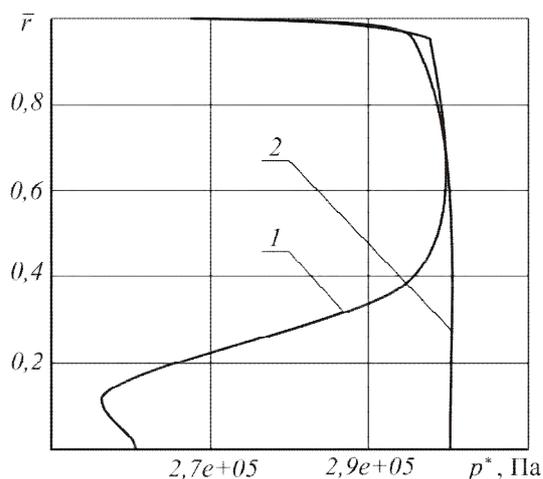


Рис. 9. Распределение полного давления в минимальном сечении сопла Лавала для закрученного (1) и не закрученного (2) потоков

Таким образом, с энергетической точки зрения в предположении равенства  $p^*$  в области стенки закрученный поток обладает меньшим потенциалом по сравнению с незагруженным, но его реализация (обеспечение большей степени расширения газа) при одинаковой геометрии сопла Лавала позволяют течения такого типа рассматривать как пер-

спективные при решении ряда задач техники и технологии.

### Результаты расчета газодинамических параметров в сверхзвуковой области сопла Лавала

В работе получены результаты расчета полей газодинамических параметров при течении закрученного потока в характерных сечениях тракта ракетного двигателя.

С точки зрения влияния на энергетические характеристики последних наибольший интерес представляет распределение осевой составляющей скорости вдоль газодинамического такта и особенно на срезе сопла Лавала.

Результаты расчета представлены на рис. 10.

Деформация закрученного потока при расширении газа в сверхзвуковой части сопла характеризуется выравниванием эпюр полной, осевой и окружной компонент скорости от минимального сечения до среза сопла. Эта тенденция объясняется двумя причинами. Первая заключается в снижении

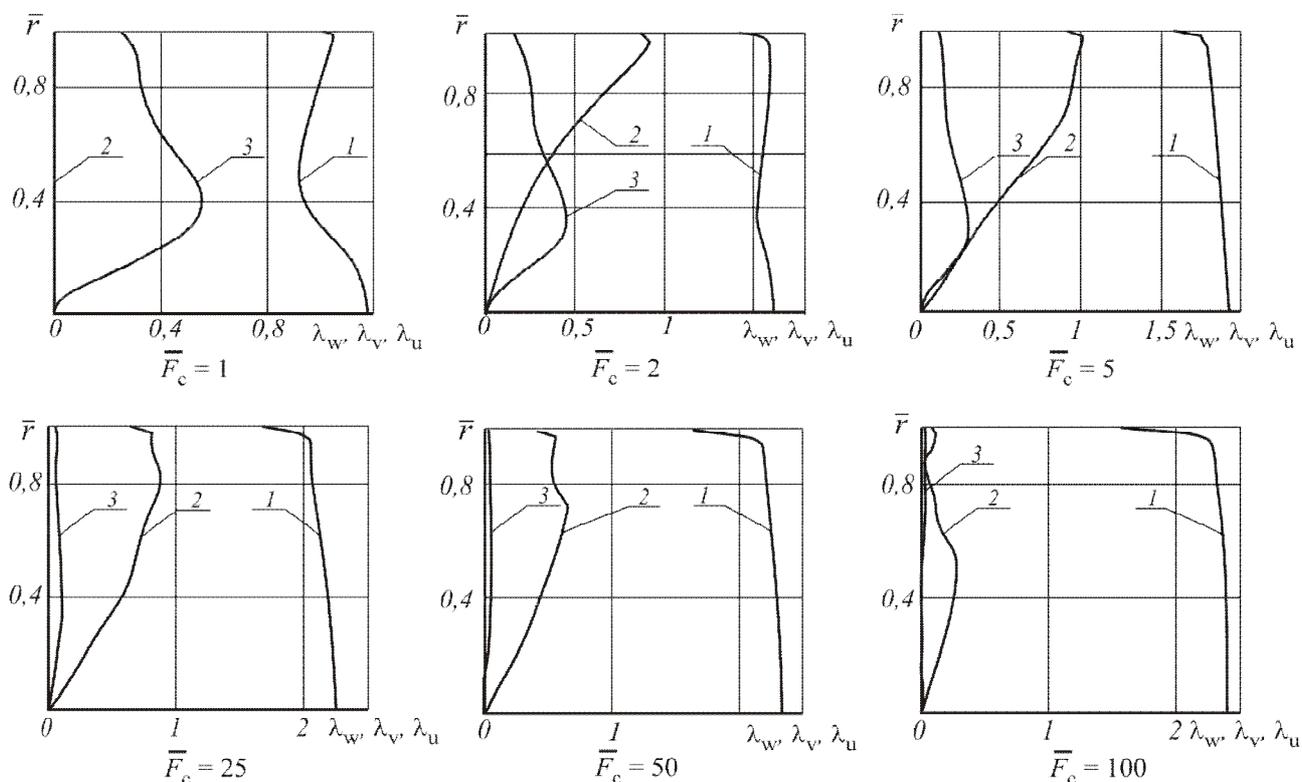


Рис. 10. Деформация эпюр скорости закрученного потока газа в сверхзвуковой области сопла Лавала,  $S = 3,4$ , тангенциальная подача газа: 1 – осевая составляющая скорости; 2 – радиальная составляющая скорости; 3 – окружная составляющая скорости

локального параметра закрутки по мере течения газа в сверхзвуковой части сопла. А вторая – потерями момента импульса за счет действия сил вязкости. Интегрально это влияние отражено на рис. 10.

Отметим также, что окружная составляющая скорости закрученного потока ( $S \geq 3,4$ ) становится пренебрежимо малой по сравнению с осевой компонентой уже при  $\bar{F}_c \geq 25 \dots 30$ .

Представляет интерес сравнение осевой составляющей скорости на оси сопла для закрученного и осевого течений в характерных сечениях сопла и оценка геометрической

степени расширения  $\bar{F}_c$ , при которой  $W$  согласуются с точностью до  $\delta \leq 1\%$ . Другими словами нахождение геометрии такого сопла, в котором параметры закрученного течения выравниваются и становятся практически сравнимыми с соответствующими параметрами при незакрученном течении газа.

На рис. 11 представлены зависимости  $\lambda_w$  на оси сопла Лавала от его безразмерной длины для потоков с различной интенсивностью вращения.

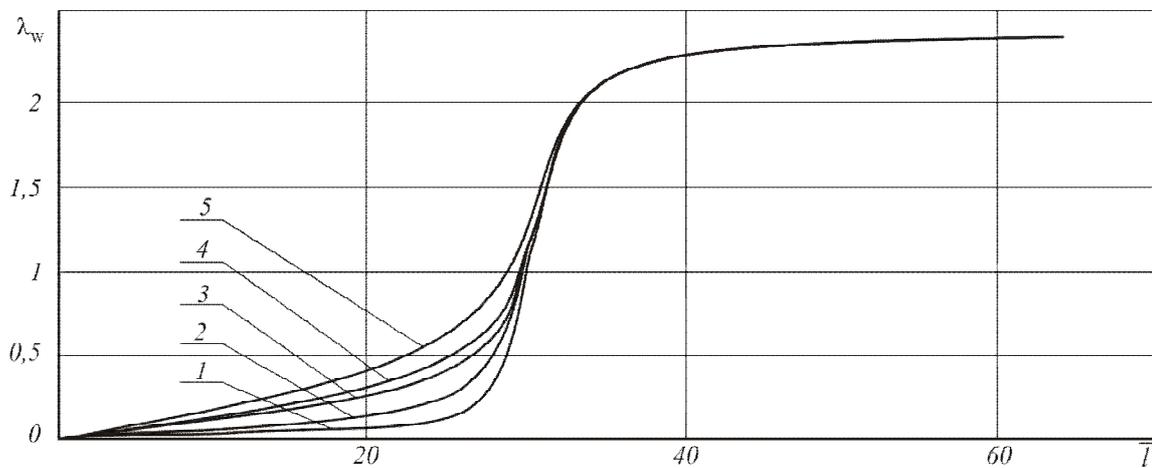


Рис. 11. Сравнение осевой составляющей скорости ( $r = 0$ ) закрученного и незакрученного потоков: 1 –  $S = 0$ ; 2 –  $S = 1,8$ ; 3 –  $S = 3,4$ ; 4 –  $S = 4,4$ ; 5 –  $S = 7,6$

Вид этих зависимостей показывает, перестройка закрученного потока газа в исследованном диапазоне параметра закрутки протекает до  $L_c \leq 0,2$ ; соответствующее  $\bar{F}_c \sim 25$ , а затем газ расширяется в сверхзвуковой области сопла как незакрученный поток. Сказанное подтверждается данными, представленными на рис. 12, где в зависимости от геометрической степени расширения сопла в виде относительной величины ( $\delta = \frac{W_3 - W_0}{W_0} \cdot 100\%$ ) показано сравнение осевой составляющей скорости на оси сопла в закрученном ( $W_3$ ) и незакрученном ( $W_0$ ) потоках. Кривые  $\delta = f(\bar{F}_c)$  ( $S = \text{const}$ ) своего рода критериальные зависимости, которые позволяют сделать вывод о том, что с точностью до  $\delta \leq 0,5\%$  при  $\bar{F}_c \geq 30$  закрученный и незакрученный потоки по газодинамическим

параметрам соответствуют друг другу в диапазоне параметра закрутки  $0 \leq S \leq 7,6$ .

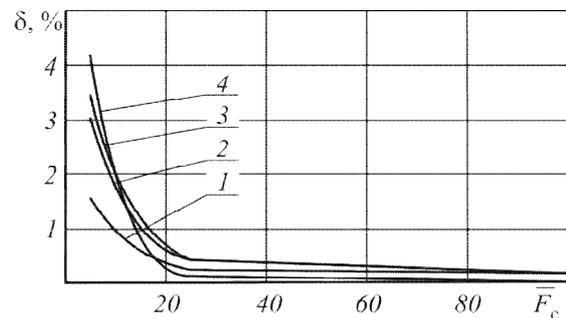


Рис. 12. Изменение осевой составляющей скорости ( $r = 0$ ) закрученного потока вдоль сопла Лавала: 1 –  $S = 1,8$ ; 2 –  $S = 3,4$ ; 3 –  $S = 4,4$ ; 4 –  $S = 7,6$

Важным вопросом газодинамики закрученных течений в сверхзвуковой области является сравнение удельного импульса тяги (энергетического параметра ракетного двигателя) с соответствующим интеграль-

Важным вопросом газодинамики закрученных течений в сверхзвуковой области является сравнение удельного импульса тяги (энергетического параметра ракетного двигателя) с соответствующим интеграль-

ным параметром для незакрученного потока.

Исходным является предположение о том, что в закрученном потоке наличие окружной составляющей скорости, которая не создает тягу, приводит к меньшим, по сравнению с осевым потоком, значениям удельного импульса тяги.

Рассмотрим результаты, представленные на рис. 13.

Здесь показана расчетная и экспериментальная зависимости относительного удельного импульса тяги (отношение удельного импульса закрученного потока к удельному импульсу незакрученного потока) от параметра закрутки.

Как экспериментальные, так и расчетные величины  $\bar{I}_y$  сосредоточены в окрестности прямой  $\bar{I}_y = 1,0$ .

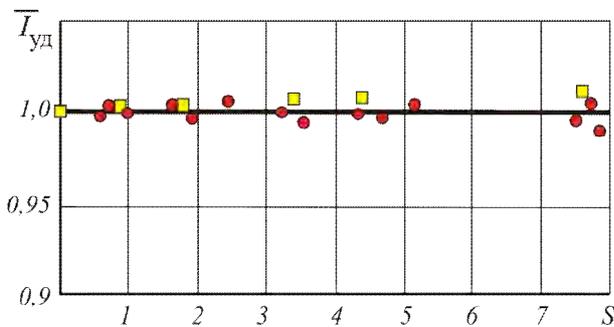


Рис. 13. Зависимость относительного удельного импульса тяги от параметра закрутки:  
□ – расчет; ● – эксперимент

Конфликт полученных результатов с исходным тезисом нивелируется в связи со следующим.

Эффективность сопла Лавалья при течении закрученного потока оценивается по тяге в осевом направлении, другими словами, по осевой составляющей скорости. При одинаковом запасе энергии на входе в сопло в случае течения осевого и закрученного потоков ( $p^* = \text{const}$ ) с ростом интенсивности вращения растет окружная составляющая скорости, которая не создает тягу в осевом направлении – это должно привести к снижению удельного импульса тяги сопла. Но в закрученном потоке, как показано выше, за счет искривления звуковой поверхности и смещения ее вверх по потоку в любом сечении сопла реализуется большая степень расширения газа и, как следствие, суммарная скорость выше, чем в аналогичном сечении осевого потока, что должно привести к увеличению удельного импульса тяги. Поэтому, несмотря на потери импульса в осевом направлении из-за наличия

окружной составляющей скорости, как показывают результаты теоретического и экспериментального исследований, удельный импульс тяги закрученного потока соответствует удельному импульсу осевого при одинаковой геометрической степени расширения сопла во всем исследованном диапазоне  $\bar{F}_c$  и  $S$ .

Таким образом, при одинаковой геометрической степени расширения сопла при течении закрученного потока в нем реализуется более высокая по сравнению с осевым течением, степень расширения газа, причем с ростом интенсивности вращения эта тенденция усиливается.

Уместно провести аналогию в сравнении эффективности двух сопел с осевым течением при одинаковом значении давления торможения на входе, но различной геометрической степени расширения. Очевидно, что в сопле с большей  $\bar{F}_c$  реализуется большая степень расширения газа, скорость на срезе сопла и, как следствие этого, более высокое значение удельного импульса тяги. Аналогичные условия возникают в сопле одинаковой геометрии, но при течении осевого и закрученного потоков рабочего тела, с той лишь разницей, что выигрыш в удельном импульсе от реализации в закрученном потоке большей степени расширения газа нивелируется потерями импульса в осевом направлении из-за наличия окружной составляющей скорости.

Очевидно, что с ростом  $\bar{F}_c$  эффект от увеличения степени расширения газа в сопле будет снижаться, но при этом следует учесть, что и окружная компонента скорости в сечении будет уменьшаться. Следовательно, неравномерность газодинамических параметров по радиусу тракта двигателя будет снижаться и стремиться к их значениям при осевом течении.

Таким образом, в работе:

- установлены некоторые закономерности течения транс- и сверхзвукового потока рабочего тела, связывающие газодинамические параметры с параметром закрутки, геометрической степенью расширения сопла, способом организации закрученного течения во входном устройстве;
- показано на примере скорости и её составляющих, что параметры транс- и сверхзвуковой области сопла Лавалья существенно неравномерны в поперечном сечении трак-

та, максимальная неравномерность характерна для трансзвуковой области течения, которая снижается по мере расширения газа в сверхзвуковой части сопла;

- выявлено, что звуковая поверхность в закрученном потоке газа имеет сложную пространственную зонтообразную форму, зависящую от большого числа факторов, и обращенную своей выпуклой частью против потока газа, что приводит к образованию сверхзвукового течения уже в минимальном сечении сопла Лаваля;

- количественно оценена деформация эпюр скорости и её осевой и окружной компонент при расширении закрученного потока газа в сверхзвуковой части сопла Лаваля, установлены предельные значения  $\bar{F}_c^*$ , при которых газодинамические параметры закрученного и незакрученного потоков соответствуют с точностью до  $\delta \leq 1\%$ ;

- проведено сравнение интегральных характеристик сопла расходных и энергетических при течении закрученного потока газа, полученных расчетным и экспериментальными методами, показывающее удовлетворительное согласование данных в исследуемом диапазоне изменения определяющих факторов.

### **Библиографический список**

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. [Текст]/ В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; Под ред. В.П. Глушко. - Т.1-10.-М.: АН СССР ВИНТИ, 1976 г.

2. Пирумов, У.Г. Течение газа в соплах. [Текст]/ У.Г. Пирумов, Г.С. Росляков.- М.: Из-во Моск. Ун-та; 1978.- 288с.

3. Крайко, А.Н. Вариационные задачи газовой динамики неравновесных и равновесных течений. [Текст]/ А.Н. Крайко// ПММ. -1964.- Т. 28. – Вып.2.

4. Иванов, М.Я. Численное решение прямой задачи о смешанном течении в соплах. [Текст]/ М.Я. Иванов, А.Н. Крайко// Изв. АН СССР. Мех. жид. и газа. – 1969. – №5.

5. Закрученный поток в сопле Лаваля (аэродинамика потока и расходные характеристики). [Текст]/ А.А. Халатов.- В кн.: Теплоперенос в жидкостях и газах: Сб. науч. Трудов. Киев: Наука думка, 1984. – с. 121 – 135

6. Халатов, А.А. Теория и практика закрученных потоков. [Текст] /А.А. Халатов:

АН УССР. Институт теоретической теплофизики. – Киев.: Наука думка, 1989. – 192 с.

7. Гупта, А. Закрученные потоки [Текст]/ А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.:Мир, 1987. – 588 с.

8. Гостинцев, Ю.А. Расходные характеристики сопла при истечении винтового потока газа [Текст]/ Ю.А. Гостинцев/Изв. АН СССР. Мех. жид. и газа. – 1969. –№4. –С. 158–161.

9. Славянов, Н.Н. Теоретические исследования закрученных течений идеального газа в сопле Лаваля [Текст]/Н.Н. Славянов// Изв. АН СССР. Мех. жид. и газа. – 1973. – №6. – С. 85 – 92.

10. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. ANSYS CFX Release 11.0. – Canonsburg: ANSYS, Inc., 2006. – 566 p.

11. Рыжков, В.В. Формирование среды численного анализа закрученных течений характерных для ЖРДМТ и их элементов [Текст]/В.В. Рыжков, М.В. Винокуров, И.И. Морозов //Проблемы и перспективы двигателестроения/ Материалы докладов международной НТК. – Самара: СГАУ, 2006. – В 2 Ч. Ч.1. – С.101 – 103.

12. Рыжков, В.В. Модель и результаты расчетно-экспериментального исследования закрученных потоков в трактах ракетных двигателей [Текст]/ В.В. Рыжков, М.В. Винокуров, И.И. Морозов //Проблемы и перспективы двигателестроения/ Материалы докладов международной НТК. – Самара: СГАУ, 2006. – В 2 Ч. Ч.1. – С.203 - 205.

### **References**

1. Thermodynamic and teplophysics properties products of combustion. [Text] / V.E.Alemasov, A.F.Dregalin, A.P.Tishin; Under the editorship of V.P.Glushko. - T.1-10.-M.: AN USSR VI-THREADS, 1976

2. Pirumov, U.G. Current of gas in nozzles. [Text] / U.G.Pirumov, G.S.Rosljakov. - M: Mosk. Un; 1978. 288 p.

3. Krajko, A.N. Variation of a problem of gas dynamics nonequilibrium and equilibrium those-cheny. [Text] / A.N.Krajko//ММТ.-1964. - Т. 28. – 2 p.

4. Ivanov, M.J. Numeric the decision of a direct problem on the mixed current in nozzles. [Text] / M.J.Ivanov, A.N.Krajko//Izv. AN USSR. Fur. The Jew. And gas. – 1969. – №5.

5. The swirled stream in a nozzle of Lavajla (aerodynamics of a stream and account

characteristics). [Text] / A.A. dressing gown. - in b.: massflow in liquids and gases. Works. Kiev: the Science, 1984. – with. 121 – 135 p.

6. Xalatov, A.A. Theory and practice of the swirled streams. [Text]/A.A. Xalatov: AN USSR. Institute of theoretical thermophysics. – Kiev.: a science , 1989. – 192 p.

7. Gupta, A. The swirled streams [Text] / A.Gupta, D.Lilli, N.Sajred. – M.:Mir, 1987. – 588 p.

8. Gostincev, U.A. Account of the nozzle characteristic at the expiration of a screw stream of gas [Text] / JU.A.gift. AN USSR. Fur. The Jew. and gas. – 1969. – №4. – p. 158–161.

9. Slavjanov, N.N. Theoretical of research of the twirled currents of ideal gas in with-ple Lavalja [Text]/N.N. Slavjanov //Izv. AN USSR. Fur. The Jew. And gas. – 1973. – №6. – p. 85 – 92.

10. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. ANSYS CFX Release 11.0. – Canonsburg: ANSYS, Inc., 2006. – 566 p.

11. Ryzhkov, V.V. Formulations of the environment of the numerical analysis of the swirled currents character th for GRDMT and their elements [Text] / V.V. Ryzhkov, M.V.Vinokurov, I.I.Morozov//Problems and prospects of engines/Materials of reports international NTK. – Samara: SSAU, 2006. – In 2 Ch. Ch.1. – p.101 – 103.

12. Ryzhkov, V.V. Model and results it is settlement-experimental research swirled streams in rocket engines [Text] / V.V. Ryzhkov, M.V. Vinokurov, I.I. Morozov // Problems and prospects of engines /Materials of reports NTK. – Samara: SSAU, 2006. – In 2 Ch. Ch.1. – p.203 - 205.

## MATHEMATICAL MODELLING AND PARAMETRIC RESEARCH OF FLOW OF THE TWISTED TURBULENT SINGLE-COMPONENT STREAM OF THE PROPULSIVE MASS IN THE TRANCE - AND SUPERSONIC AREAS OF LAVAL NOZZLES

© 2009 V. V. Ryzhkov, I. I. Morozov

Samara State Aerospace University

With use of mathematical model of the space (twisted) viscous (turbulent) flow of a single-component propulsive mass in a trans-and supersonic areas on the basis of system of the equations of Nave-Stokes and the software of computer systems ANSYS CFX and STAR-CD CD-adapco, distribution of gasdynamic properties in Laval nozzles is gained and some regularity of such type of flows is determined.

*Laval nozzle, trans-and supersonic field of flow, swirl parameter, way of the organization of swirled flow, gasdynamic parameters, sound surface, legitimacies of flow*

### Информация об авторах

**Рыжков Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, руководитель научно-исследовательского центра космической энергетики Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 267-45-92. E-mail: [ke\\_src@ssau.ru](mailto:ke_src@ssau.ru). Область научных интересов: рабочие процессы жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

**Морозов Илья Игоревич**, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра космической энергетики Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 267-45-92. E-mail: [engin@ssau.ru](mailto:engin@ssau.ru). Область научных интересов: рабочие процессы в тепловых двигателях.

**Ryzhkov Vladimir Vasilievitch**, Candidate of Engineering Science, chief of scientific research center space energy of Samara State Aerospace University. Phone: (846) 267-45-92. E-mail: [ke\\_src@ssau.ru](mailto:ke_src@ssau.ru). Area of research: working procedure LREST and propulsion device with LREST.

**Morozov Ilya Igorevich**, younger technical scientist of scientific research center space energy of Samara State Aerospace University. Phone: (846) 267-45-92. E-mail: [engin@ssau.ru](mailto:engin@ssau.ru). Area of research: working procedure LREST and propulsion device with LREST.