

Р и с. 2. Оптимальные по тепловыделению соотношения геометрических параметров вихревой камеры:  $\tau_a^{oc}$  и  $\tau_n$  — м/с;  $\alpha_*$  и  $\varphi_{pkr}$  — безразмерные;  $\tau_a^{oc} = 0,25$ ;  $\varphi_{pkr} = 1,0$

для выбора параметров вихревой камеры сгорания и рабочего процесса, обеспечивающих полное энергосодержание в ее объеме.

### Л и т е р а т у р а

И. Шаулов Ю.Х., Лернер М.О. Горение в ЖРД. — М.: Оборонгиз, 1961.

УДК 533.17:629.7.036.3

С.В.Дятел, В.Е.Нигодюк, В.В.Рыжков

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ  
ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ГАЗА  
В ТРАНСЗВУКОВОЙ ОБЛАСТИ СОПЛА ЛАВАЛЯ

П р и н я т ы е о б о з н а ч е н и я

$d_*$  — диаметр минимального сечения сопла;  $\alpha_*$  — параметр закрутки в форме Магера;  $n$  — степень нерасчетности;  $z_c$  — расстояние от среза сопла до прямого скачка уплотнения;  $\bar{z}_c$  — отно-

сительное расстояние до скачка уплотнения;  $K$  - отношение удельных теплоемкостей;  $M$  - число Маха перед скачком уплотнения;  $M_1$  - число Маха на характеристике у кромки сопла, параллельной оси струи;  $M_{z*}$  - число Маха на оси минимального сечения сопла;  $\lambda_{z*}$  - безразмерная скорость на оси минимального сечения сопла.

В работе определяются газодинамические параметры закрученного потока в минимальном сечении на основе экспериментального исследования вращающейся струи газа, истекающей из сужающегося сопла при сверхкритических перепадах давления.

Работа проводилась на газодинамическом стенде, позволяющем регистрировать теневую структуру сверхзвуковой струи с помощью прибора Теплера ИАБ-45I и измерять расход рабочего тела.

В эксперименте использовались конфузорные сопла с диаметром минимального сечения  $d_* = 5,3$  мм, закрученный поток в которых создавался сменными вихревыми камерами, обеспечивающими изменение параметра закрутки в форме Магера, равного отношению окружной скорости на стенке в минимальном сечении к максимальной скорости газа, в диапазоне  $\alpha_* = 0-0,5$ . Истечение происходило в среду с нормальными атмосферными условиями.

В рассматриваемом случае на характеристики струи влияние оказывают лишь степень нерасчетности  $\eta$  и скорость газа на срезе сопла [1].

Анализ полученных портретов осевой и закрученной струй при различных  $\eta$  и  $\alpha_*$  позволяет утверждать, что вращение потока не приводит к качественным изменениям в структуре течения, так как во всем исследованном интервале сохраняется маховая конфигурация сверхзвуковой струи. Вместе с тем замечено, что диск Маха в случае закрученной струи принимает зонтообразную форму, обращенную своей выпуклой частью навстречу потоку. Это указывает на существенную неравномерность газодинамических параметров вдоль радиуса сопла. Второй отличительной особенностью сверхзвуковой закрученной струи газа, истекающей в затопленное пространство, является эффект уменьшения расстояния между срезом сопла и прямым скачком уплотнения по мере увеличения  $\alpha_*$ .

Результаты обработки шпирен-фотографий представлены на рис.1, где по оси ординат отложено относительное расстояние до скачка уплотнения  $\bar{z}_c$ , равное отношению соответствующих расстояний

при истечении закрученной и осевой струй. Зависимость  $\bar{z}_c = f(\alpha_*)$  можно считать универсальной, поскольку она является справедливой при любых степенях нерасчетности. Анализ теневых снимков также позволяет сделать важный с физической точки зрения вывод об отсутствии зоны обратных токов в сопле.

Экспериментально полученный факт уменьшения расстояния до скачка уплотнения с увеличением закрутки объясняется уменьшением степени нерасчетности в закрученной струе, а также увеличе-

нием скорости газа в минимальном сечении. Очевидно, оба этих эффекта имеют место при истечении закрученного потока из сопла. Для дифференцированной оценки влияния степени нерасчетности на определенное по оси струи безразмерное расстояние  $\bar{z}_c$  проводилось зондирование статического давления на оси в минимальном сечении сопла при истечении обоих типов струй (рис. 2).

Полученные данные как по осевой, так и по закрученной струям, что является особенно важным, аппроксимируются единой зависимостью, удовлетворительно описывающейся уравнением вида

$$\frac{\bar{z}_c}{d_*} = 0,74 (\kappa n)^{0,5}, \quad (1)$$

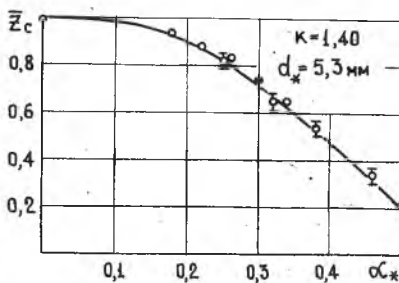
где  $\kappa$  - отношение удельных теплоемкостей.

Положение центрального скачка уплотнения в недорасширенной осевой струе газа для сопла без диффузорной части описывается известным соотношением

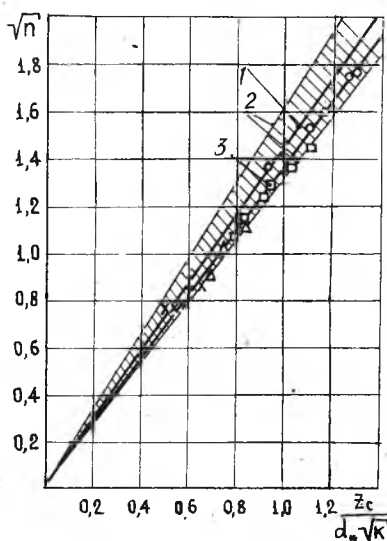
$$\frac{\bar{z}_c}{d_*} = 0,69 (\kappa n)^{0,5}. \quad (2)$$

Расхождение в значении постоянного множителя находится в пределах 10%, что соответствует точности эксперимента.

Полученные в эксперименте результаты позволяют замкнуть систему уравнений для нахождения скорости на оси минимального сечения [1]:



Р и с. 1. Зависимость относительного расстояния до скачка уплотнения  $\bar{z}_c$  на оси закрученной струи от параметра закрутки  $\alpha_*$ :  $\kappa = 1,40$ ,  $d_* = 5,3$  мм,  $\circ$  - результаты экспериментов [2]



Р и с. 2. Зависимость степени нерасчетности осевой и закрученной сверхзвуковой струй  $\sqrt{n}$  от безразмерного расстояния до скачка уплотнения:  $z_c/d_*\sqrt{k}$ :  $k = 1,40$ ,  $d_* = 2,3$  мм; о-в-д-х соответственно  $\alpha_* = 0; 0,25; 0,32; 0,38; 1$ ; соответственно  $z_c/d_* = 0,69$  (кп)<sup>0,5</sup>;  $0,69$  (кп)<sup>0,5</sup> +10%;  $0,74$  (кп)<sup>0,5</sup>

диапазоне изменения параметра закрутки скорость газа на оси минимального сечения сопла превышает звуковую, имея тенденцию к увеличению с ростом  $\alpha_*$ .

Результаты работы дают возможность провести оценку достоверности аналитических моделей, описывающих течение закрученного потока в сопле. Анализ показал, что лучше других согласуется с данными эксперимента модель однородного винтового потока [3],

$$dz = \frac{\sqrt{M^2-1}}{2 \left[ \frac{k+1}{2} + \frac{k-1}{2} (M^2-1) \right]} \quad (3)$$

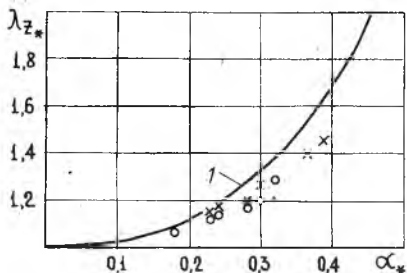
$$\times d(M^2-1) - \frac{d(M^2-1)}{2(M^2-1)}$$

$$\frac{(1 + \frac{k-1}{2} M^2)^{\frac{k-1}{k}}}{\frac{2k}{k+1} M^2 - \frac{k-1}{k+1}} = n \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_{z_*}^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4)$$

$$\frac{\pi}{2} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arctg \sqrt{\frac{k-1}{k+1} (M^2-1)} - \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arctg \sqrt{\frac{k-1}{k+1} (M_{z_*}^2-1)} + \arctg \sqrt{M_{z_*}^2-1} \quad (5)$$

где  $M$ ,  $M_1$ ,  $M_{z_*}$  - соответственно числа Маха перед скачком, на характеристике у кромки сопла, параллельной оси струи, и на оси минимального сечения, описывающие течение сверхзвуковой струи в области между срезом сопла и центральным скачком уплотнения.

Представленная на рис. 3 зависимость  $\lambda_{z_*} = f(\alpha_*)$  позволяет утверждать, что в исследованном



Р и с. 3. Зависимость скорости течения закрученного потока газа  $\lambda_{z_*}$  на оси минимального сечения сопла от параметра закрутки  $\alpha_*$ :  $k = 1,40$ ; о-  $n = 3,4$ ; х-  $n = 5,0$

результаты расчета по которой показаны на рис. 3 (кривая I).

Таким образом, экспериментальное исследование локальных газодинамических параметров, с одной стороны, позволило установить факт существования сверхзвукового течения в минимальном сечении сопла и показать, что действительная степень расширения потока увеличивается с ростом интенсивности вращения газа в сопле неизменной геометрии, а с другой - показать, что реальные параметры течения в этой области достаточно достоверно могут быть описаны квазиодномерной винтовой математической моделью.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г и н з б у р г И.П. Аэродинамика. - М.: Высшая школа, 1966.
2. Г о с т и н ц е в Ю.А. и др. О структуре сверхзвуковой закрученной струи газа при истечении с недорасширением. - Изв. АН СССР, МЖГ, № 5, 1969.
3. А ф а н а с е н к о в А.Н., Г о с т и н ц е в Ю.А., У с - п е н с к и й О.А. Квазиодномерная теория сопла для винтового потока газа. - Изв. АН СССР, МЖГ, № 5, 1977.