

ЭПЮРЫ СИЛ НА ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ СОПЛА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА С УПРАВЛЯЮЩИМИ СТРУЯМИ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА

Рассмотрены эпюры сил возмущений давления сверхзвукового потока в сопле ЖРД при впрыске компонента топлива на разных удалениях от среза сопла. Получена ориентировочная зависимость координаты точки приложения равнодействующего, управляющего вектором тяги сопла, бокового усилия от расстояния впрыскивающих устройств до выходного сечения сопла

Розглянуті епюри сил збудження тиску надзвукового потоку в соплі РРД при вприску компонента палива на різних відстанях від зрізу сопла. Отримана орієнтувальна залежність координати точки прикладення рівнодіючого, керуючого вектором тяги сопла, бокового зусилля, від відстані вприскиваючих пристроїв до вихідного зрізу сопла.

Epures for forces of LRE nozzle supersonic flow pressure disturbances at injection of fuel components in different distances from a nozzle section are considered. A reference dependence of the point coordinate of the resultant side thrust, controlling the nozzle thrust vector, on the distance injecting devices to the nozzle outlet section is obtained.

Одной из важнейших задач при разработке систем термогазодинамического регулирования вектора тяги сопла ракетного двигателя является определение эпюры сил от возмущения давления на стенке сопла в области взаимодействия основного потока сопла и управляющего инжектируемого потока. Эпюра сил избыточного давления необходима для оценки силовых нагрузок на стенку сопла, определения координаты линии действия суммарного бокового усилия и расчета управляющего момента сил, действующего на управляемый летательный аппарат [1, 2, 3].

Задача о построении упомянутой эпюры сил решалась в работе [4], при этом использовались расчетные и экспериментальные данные о возмущениях давления в сопле экспериментальных твердотопливных и жидкостных ракетных двигателей с впрыском в средней части сверхзвукового сопла боковой струи фреона, воды, двухкомпонентного топлива.

Процессы, протекающие в сверхзвуковом потоке в сопле ЖРД при впрыске одного из жидких компонентов топлива с целью регулирования вектора тяги, имеют ряд неисследованных особенностей, обусловленных тем, что:

1 – для обеспечения высокой эффективности регулирования вектора тяги применяется многоточечная инжекция жидкости в сопло, через 3, 5, ..., n форсунок впрыска, располагаемых на разном удалении от выходного сечения сопла;

2 – впрыскиваемые струи обладают высоким скоростным напором; проникая в высокоскоростной и высокотемпературный набегающий поток, они быстро деформируются и разрушаются с образованием некоторого быстро испаряющегося факела распыла жидкости над поверхностью сопла за сечением впрыска;

3 – за сечением впрыска инжектируемые струи взаимодействуют (в том числе и химически) между собой и с набегающим потоком сопла.

Целью настоящей работы является исследование эпюры сил и зависимости координаты точки приложения бокового усилия, управляющего вектором тяги сопла ЖРД, возникающего при впрыске компонента топлива, от расположения впрыскивающих устройств по длине сопла.

Решение задачи базируется на расчетных и экспериментальных данных, полученных в [4], с уточнением их и адаптацией к этим условиям.

Многоточечная инжекция на начальном участке взаимодействия с набегающим сверхзвуковым потоком представляется как совокупность автономных единичных струй (рис. 1).

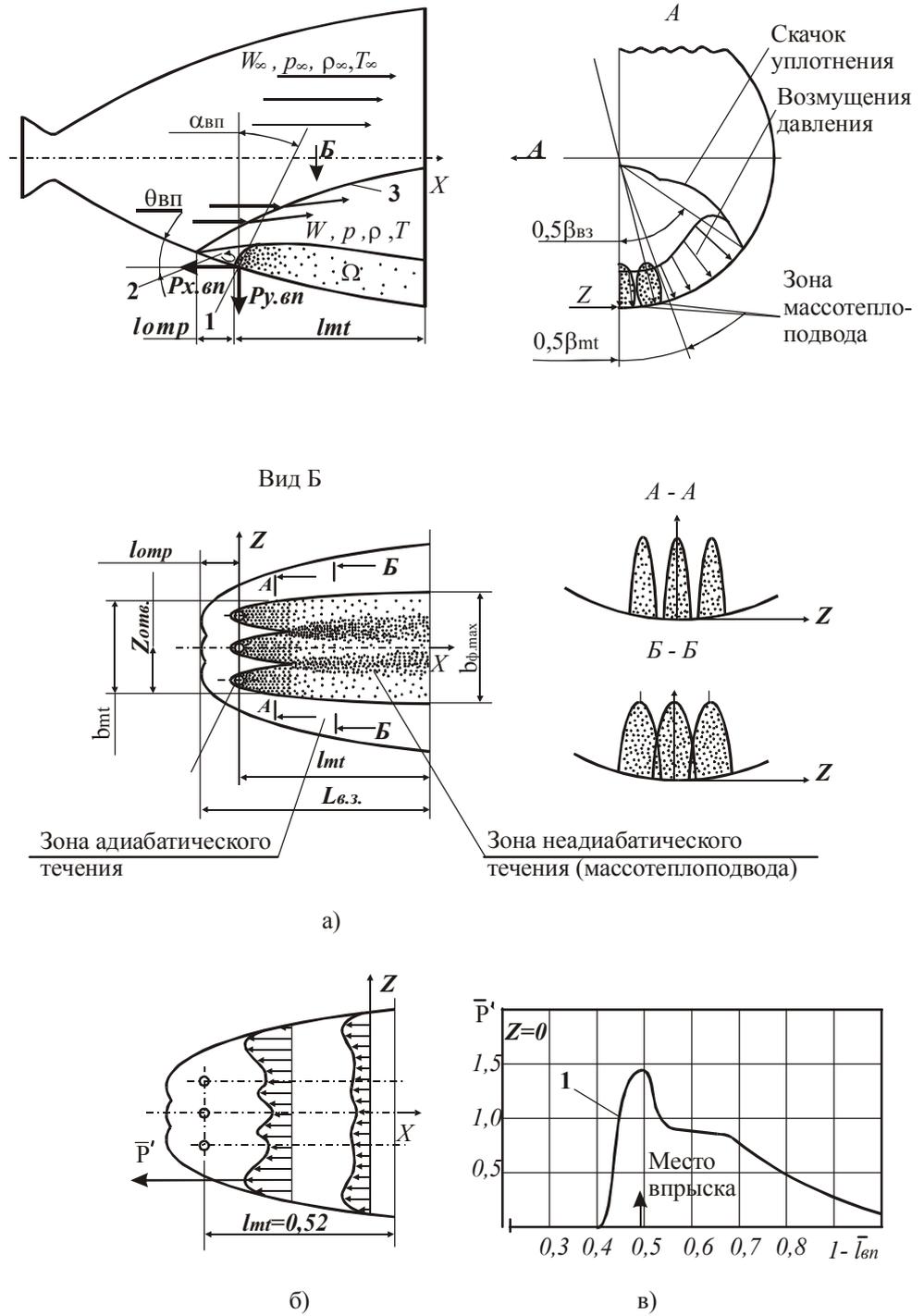


Рис. 1

Впрыскиваемая боковая струя 1, проникая в сверхзвуковой поток, разрушается на части и капли разных размеров, образуя сложный факел распыленной жидкости Ω и двухфазное течение потока с неравномерным по объему процессом испарения и выгорания жидкости. Основание струи и полупроницаемый факел распыленной, быстро испаряющейся и сгорающей жидкости представляют собой струйное препятствие, при обтекании которого в набегающем сверхзвуковом потоке образуется перед впрыскиваемой жидкостью отрывная зона 2, у вершины которой берет начало косой скачок уплотнения, соединяющийся ниже по течению с криволинейной ударной волной 3 (рис. 1а).

Форма и размеры передней отрывной зоны зависят от высоты, ширины и конфигурации передней зоны факела распыливания впрыскиваемой жидкости. При этом длина передней отрывной зоны ($l_{отр}$) и конфигурация начального участка определяются, в основном, параметрами единичной струи [4, 5].

Длина зоны отрыва $l_{отр}$ в плоскости симметрии возмущенной зоны (рис. 1а), отсчитываемая от передней кромки отверстия впрыска, определяется начальной высотой струйного препятствия $h_{пр}$ и углом отрыва $\delta_{отр}$ пограничного слоя:

$$l_{отв} = K_e h_{пр} \operatorname{ctg} \delta_{отр}, \quad (1)$$

где K_e – коэффициент, определяемый экспериментально.

Для определения высоты струйного препятствия используется одна из известных расчетно-экспериментальных зависимостей [4, 5]:

$$\frac{h_{пр}}{D_{вп}} = K_h M_\infty^{0,25} \bar{q}_ж^{0,625} \cos \delta_{отр} = \frac{1}{M_\infty} \left(\frac{p_{вп}}{p_\infty} \right)^{0,625} \cos \delta_{отр}, \quad (2)$$

где $h_{пр}$ – высота струйного препятствия; $D_{вп}$ – диаметр отверстия впрыска; $\bar{q}_ж = q_ж / q_\infty$ – относительный скоростной напор впрыскиваемой жидкости; q_∞ – скоростной напор набегающего потока сопла; M_∞ – число Маха набегающего потока; $p_{вп}$ – давление впрыскиваемой жидкости перед отверстием впрыска; p_∞ – статическое давление набегающего потока; $\delta_{отр}$ – угол отрыва пограничного слоя набегающего потока; $K_h = (0,8 - 0,9)$ – экспериментальный коэффициент.

В работе [6] для глубины проникновения жидкости в сверхзвуковой поток используется эмпирическая зависимость

$$\frac{h_{пр} M_\infty}{D_{вп}} = 6,77 (p_{вп} / p_\infty)^{0,5}. \quad (3)$$

Угол жидкого полукопнуса в большинстве работ определяется по известным формулам для отрывных течений, в частности [4]:

$$\delta_{отр} = 0,049 (1 + 1,42 M_\infty). \quad (4)$$

Ширина зоны отрыва $b_{отр}$ в сечении впрыска определяется шириной передней зоны факела распыла b_ϕ инжестируемой жидкости. Ширину факела распыливания жидкости можно определить по эмпирической зависимости [5, 6]

$$b_{отр} = b_\phi + K_\phi D_{вп} (p_{вп} / p_\infty)^{0,133}, \quad (5)$$

где K_ϕ – коэффициент, определенный экспериментально и равный $\sim 2,7$.

Граница возмущенной зоны (рис. 1б) определяется уравнением

$$Z = b_{\text{mt}} + A_z X^{0,5}, \quad (6)$$

где A_z – коэффициент для единичной круглой струи равный $2l_{\text{отр}}^{0,5}$.

Возмущения давления $\bar{p}'_{\text{отр}}$ на стенке сопла в отрывной зоне зависят в основном от M_∞ и показателя политропы χ и определяются эмпирическими уравнениями для критических давлений $p_{\text{отр}}$ при отрывных течениях, в частности сообщаемых в [4]

$$\bar{p}'_{\text{отр}} = \frac{p_{\text{отр}} - p_\infty}{p_\infty} = \frac{2\chi_\infty}{\chi_\infty + 1} (0,577M_\infty + 0,435) - 1. \quad (7)$$

При многоточечной инжекции неравномерность давления в поперечных сечениях сопла увеличивается (рис. 1б). Среднее давление $p_{\text{отр ср}}$ на поверхности сопла будет меньше отрывного критического, так что

$$p_{\text{отр ср}} = \kappa_{\text{отр}} p_{\text{отр}}, \quad \kappa_{\text{отр}} < 1. \quad (8)$$

При $z_{\text{отв}} < \epsilon_\phi$ процесс взаимодействия инжектируемых струй наступает в сечении сопла, где расположены форсунки впрыска, и может переходить в переднюю отрывную зону.

Давление за сечением впрыска в периферийных зонах за скачком уплотнения $p_{\text{ск}}$ более высокое в сравнении с давлением в неадиабатической зоне и определяется по формуле [4]:

$$\frac{p_{\text{ск}}}{p_\infty} = \frac{\chi_\infty M_\infty^2}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}} \text{tg} \alpha_{\text{ск}} - 1, \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{ск}}$ – угол скачка уплотнения.

В неадиабатической области течения за сечением впрыска при многоточечной инжекции жидкости эпюра возмущений давления в поперечных сечениях сопла имеет волнообразный характер, зависящий от параметра $z_{\text{отв}}$. При $z_{\text{отв}} > \epsilon_\phi$ гребни давления находятся в плоскостях, проходящих через ось отверстия впрыска, при $z_{\text{отв}} < \epsilon_\phi$ – в зонах между отверстиями впрыска. С удалением от сечения впрыска к выходному сечению сопла давление снижается во всех зонах. Процессы в этой области чрезвычайно сложны, зависят от многих конструктивных факторов, свойств и параметров инжектируемых потоков и основного потока сопла. Для возмущений давления в этой зоне используются соотношения, полученные в [4] для малых углов δ_{mt} отклонения граничной линии неадиабатического потока

$$\bar{p}'_{3\text{m}} = \frac{p_{3\text{m}} - p_\infty}{p_\infty} = \frac{\chi_\infty M_\infty^2}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}} \delta_{\text{mt}}. \quad (10)$$

Для определения угла отклонения потока δ_{mt} используется уравнение, полученное в [4] при решении задачи о возмущениях скорости сверхзвукового потока идеального газа при наличии источников массы и тепла:

$$\delta_{\text{mt}} = \frac{dY}{dX} \approx \frac{C_{\text{mt}} h_{\text{mt}}}{W_\infty} = \frac{h_{\text{mt}}}{W_\infty} \left[\frac{\chi_\infty - 1}{Aa_\infty^2} (\dot{q} + i_{0\text{m}} \dot{m}) + \dot{m} \right], \quad (11)$$

$$C \approx \frac{\Delta C}{\rho_{\infty} h_{mt} S_{mt}}, \quad \dot{m} \approx \frac{\Delta \dot{m}}{\rho_{\infty} h_{mt} S_{mt}}, \quad (12)$$

где $\Delta \dot{q}$, $\Delta \dot{m}$ – количества тепла и массы, подводимые к потоку в единицу времени; S_{mt} – площадь поверхности с зоной массотеплоподвода, C_{mt} – функция массового подвода; i – энтальпия жидкости.

Определив границы зон возмущенного течения и возмущения давления в этих зонах, можно построить эпюры сил избыточного давления в плоскости симметрии возмущенной зоны для разного удаления инжектирующих устройств от выходного сечения сопла ($\bar{l}_{вп}$). Для построения эпюры элементарных сил вдоль сопла интегрируются возмущения давления на элементарных участках ΔX в поперечных сечениях сопла в области возмущенного течения, в которой выделяется три зоны: передняя отрывная S_1 ; зона неадиабатического течения за отверстиями впрыска S_2 ; зона адиабатического течения за отверстиями впрыска S_3 (рис. 2).

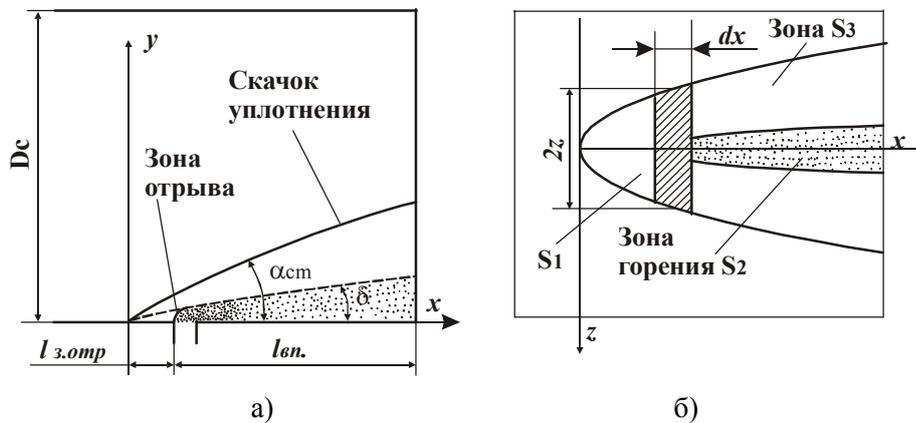


Рис. 2

Используя описанную методику, построены эпюры элементарных сил по оси сопла при впрыске фреона-12 и воды (по данным [4]), а также окислительного (азотный тетроксид) и горючего (диметилгидразин) компонентов топлива по данным работы [4]. При этом уточнены известные данные [4, 7] о возмущениях давления в передней отрывной зоне, уточнены границы возмущенных зон, учтено влияние кривизны сопла на элементарные боковые силы, а также неравномерность массотеплоподвода. Уточненные, в сравнении с полученными в [4], эпюры элементарных боковых сил избыточного давления по длине сопла приведены на рисунке 3, все они более неравномерны, большие боковые силы наблюдаются в районе инжектирующих отверстий.

Приведенные на рисунке 3 расчетные эпюры относительных элементарных сил при впрыске окислительного компонента топлива (1) близки к наблюдавшимся при впрыске фреона-12 (1а), при впрыске горючего (2) ближе к наблюдавшимся при впрыске воды (2а). Отличия эпюр (1 и 2) состоят в том, что возрастает вклад в создание боковых сил областей, расположенных в районе отверстий впрыска, при этом равнодействующая сил возмущенного давления смещается в сторону ближе к отверстиям впрыска.

Следует учесть, что процессы взаимодействия сверхзвукового потока и впрыскиваемой жидкости в сопле двигателя, а следовательно, эпюры сил и

координаты точки приложения управляющего бокового усилия зависят от многих параметров: от ширины зоны впрыска $\theta_{\text{вт}}$, от химической активности и термодинамического состояния впрыскиваемого компонента топлива, от степени расширения и диаметра критического сечения сопла, от относительного расхода впрыскиваемой жидкости $\bar{m} = \dot{m}_{\text{вп}} / \dot{m}_{\text{с}}$, от относительного расстояния форсунок впрыска от среза сопла $\bar{l}_{\text{вп}} = l_{\text{вп}} / L_{\text{с}}$ и др.

На рисунке 3 для сравнительного анализа приведены в относительных параметрах расчетные эпюры сил и координаты точки приложения по длине сопла равнодействующей боковой силы, возникающей в сопле ЖРД при вдуве газа, близкой к расчетной эпюре сил при впрыске вскипающей в сопле окислительного или горючего компонента топлива. Как видно, при впрыске вскипающей жидкости вклад передней области в создание бокового усилия возрастает, а координата точки приложения равнодействующей приближается к сечению впрыска.

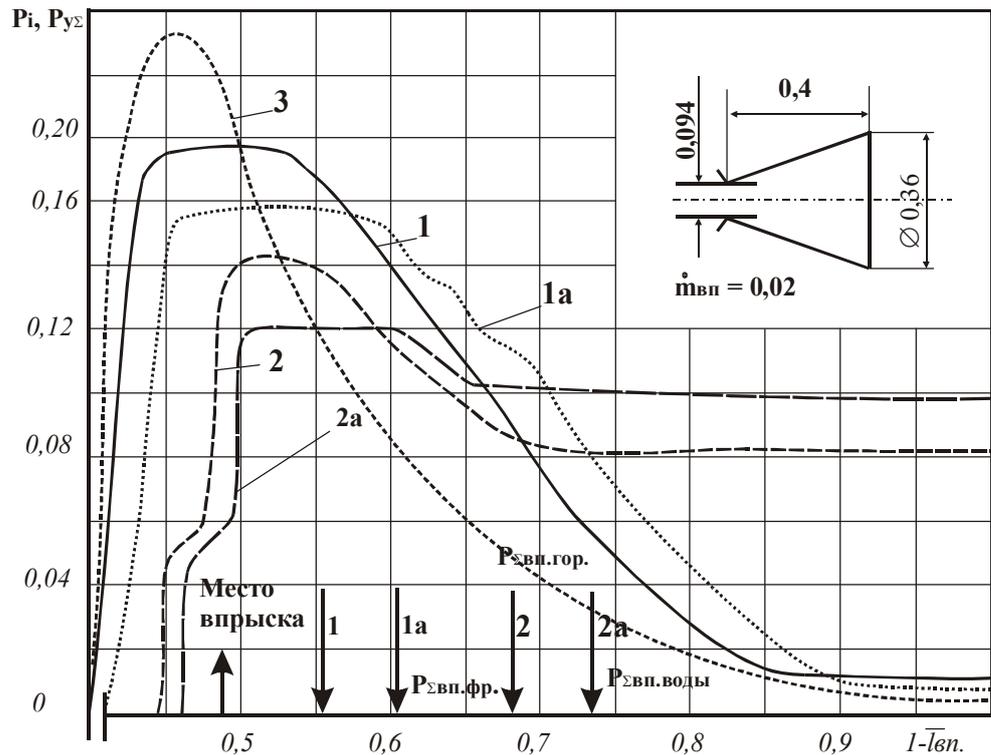


Рис.3

Из общего анализа изменений параметров взаимодействия основного и инжектируемого потоков и возникающих эпюр сил, легко прийти к выводу о существовании некоторой корреляционной зависимости между расположением форсунок впрыска $\bar{l}_{\text{вп}}$ и координаты точки приложения бокового усилия X_{py} . Так, при уменьшении $\bar{l}_{\text{вп}}$ вклад области за сечением впрыска в создание суммарного бокового усилия уменьшается, а вклад областей передних зон возрастает в связи с уменьшением угла конусности сопла и уменьшением площади взаимодействия потоков за сечением впрыска; координата X_{py} имеет тенденцию приближаться к сечению сопла, где расположены форсунки впры-

ска. При смещении $\bar{l}_{\text{вп}}$ ближе к критическому сечению угол конусности сопла возрастает, что создает потери этой области в создании боковых сил, при этом возрастают элементарные силы на увеличенной площади за сечением впрыска жидкости. Координата X_{py} имеет тенденцию к удалению от сечения впрыска.

В системе координат с центром в плоскости критического сечения и осью X , параллельной продольной оси сопла и направленной к выходному сечению, такую зависимость можно представить в следующем виде

$$\bar{X}_{\text{py}} = X_{\text{py}} / L_c = 1 - (\bar{l}_{\text{вп}} - \Delta \bar{l}_{\text{вп}}). \quad (13)$$

В общем случае величина $\Delta \bar{l}_{\text{вп}}$ зависит от многих взаимозависимых параметров

$$\Delta \bar{l}_{\text{вп}} = f(\bar{l}_{\text{вп}}, D_{\text{с кр}}, D_{\text{с ср}}, p_k / p_a, \theta_{\text{с вп}}, \theta_{\text{с i}}, \alpha_{\text{вп}}, \beta_{\text{вп}}, \varphi_{\text{пт}}, \dots), \quad (14)$$

где $D_{\text{с кр}}$ – диаметр критического сечения сопла; $D_{\text{с ср}}$ – диаметр выходного сечения сопла; $\theta_{\text{с i}}$ – текущий угол конусности сопла; $\varphi_{\text{пт}}$ – коэффициент полноты выделения энергии впрыскиваемой жидкости; $\alpha_{\text{вп}}$ – угол впрыска жидкости (угол между осью отверстия впрыска и осью сопла).

Задача определения $\Delta \bar{l}_{\text{вп}}$ решается при резком сокращении варьируемых параметров с использованием графоаналитического метода и предусматривает определение количественных зависимостей координаты X_{py} от параметра $\Delta \bar{l}_{\text{вп}}$ для некоторого конкретного типа ЖРД (в данном случае тяга двигателя ~ 80 кН, а степень расширения сопла $p_k / p_a = 1600$). В этом случае задача решается при

$$D_{\text{с кр}}, D_{\text{с ср}}, p_k / p_a, \alpha_{\text{вп}}, \beta_{\text{вп}}, \varphi_{\text{пт}} = \text{const}. \quad (15)$$

Используя описанные выше методики расчета, построены границы и эпюры возмущений давления на стенке сопла, эпюры элементарных боковых сил вдоль сопла в плоскости симметрии возмущенной зоны, величина и координата точки приложения суммарного бокового усилия при разных значениях параметра при $\bar{l}_{\text{вп}} = l_{\text{вп}} / L_c = 0,3; 0,4; 0,6; 0,8$.

Определяемые таким образом величины боковых сил сравниваются с расчетно-экспериментальными данными, полученными при огневых испытаниях камер ЖРД и описанными, в частности, в работе [4]. Для согласования полученных разными расчетными методиками боковых сил вносятся корректировки в исходные параметры возмущенных зон на стенке сопла и таким образом корректируется эпюра сил и величина бокового усилия.

Ниже сообщаются основные результаты обработки и анализа расчетных данных (не приводя результаты многочисленных вычислений и полученные эпюры элементарных сил вдоль сопла при разном расположении инжектирующих устройств по длине сопла упомянутой выше камеры ЖРД).

Согласно полученным расчетным данным, при выполнении условия (15) величина $\Delta \bar{l}_{\text{вп}}$ изменяется мало в представляющем практический интерес диапазоне $\bar{l}_{\text{вп}} = 0,3 - 0,7$ и зависимость X_{py} от величины $\bar{l}_{\text{вп}}$ можно представить в виде

$$\bar{X}_{py} = X_{py} / L_c = 1 - K_{Xpy} \bar{l}_{вп}. \quad (16)$$

Применительно к ЖРД верхних ступеней ракет коэффициент в уравнении (16) можно принять в первом приближении постоянным и равным при впрыске неперегретых горючего компонента топлива $K_{Xpy}^{гор} = 0,6$; окислительного компонента $K_{Xpy}^{ок} = 0,8$; при впрыске вскипающего компонента получено $K_{Xpy}^{пер} = 0,9$.

При увеличении степени расширения сопла основные параметры процессов, протекающих в сопле, сохраняются, увеличение геометрических размеров обтекаемых поверхностей сопла создает условия для повышения полноты испарения и выгорания топлива в области малых углов конусности сопла, в связи с чем оптимальное место впрыска смещается ближе к выходному сечению сопла [9]. Зависимость координаты $\bar{X}_{py} = f(\bar{l}_{вп})$ остается близкой к уравнению (16).

Несмотря на то, что многие приведенные выше результаты ближе к качественным, полученные расчетные формулы для построения эпюры сил приемлемы для инженерных расчетов. Они позволяют определить распределение нагрузок на сопло, величины сил, управляющих вектором тяги, координату точки приложения бокового усилия, генерируемого впрыском жидкости, а также оценить влияние ряда факторов на упомянутые параметры.

- 1 Коваленко Н. Д. Ракетный двигатель как исполнительный орган системы управления полетом ракет / Н. Д. Коваленко. – Днепропетровск : ИТМ НАНУ и НКАУ, 2003. – 412 с.
- 2 Иголов И. М. Ракета как объект управления / И. М. Иголов, Л. Д. Кучма, Н. В. Поляков, Ю. Д. Шептун. – Днепропетровск : Арт – Пресс, 2004. – 541 с.
- 3 Коваленко Н. Д. Определение боковых сил в ЖРД при впрыске компонента топлива в сверхзвуковую часть сопла по телеметрической информации летных испытаний / Н. Д. Коваленко, В. Н. Шнякин, О. А. Аксюта, Г. Н. Коваленко, А. В. Нестеров, Г. А. Стрельников, Р. Н. Темченко, Е. Т. Шейко // НТС КТ РВ. – 2008. – № 1. – С. 91 – 104.
- 4 Коваленко Н. Д. Управление сверхзвуковыми газовыми потоками в реактивных соплах / Н. Д. Коваленко. – Киев : Наук. думка, 1992. – 208 с.
- 5 Коваленко Г. Н. Гидродинамика боковых струй, управляющих сверхзвуковым потоком / Г. Н. Коваленко, Н. П. Сироткина // Вестник ДНУ. Проблемы высокотемпературной техники. – 2008. – № 11 – С. 67 – 83.
- 6 Колтин Д. Исследование проникновения струи жидкости, впрыскиваемой в сверхзвуковой поток / Д. Колтин, П. Хорн, Ф. Райхенбах // РТК. – 1968. – № 5. – С. 100 – 108.
- 7 Ньютон Р. Исследования взаимодействия основного потока в РД с вторичным потоком создаваемого с целью управления вектором тяги / Р. Ньютон, К. Срейд // РТК. – 1962. – № 8. – С. 22 – 23.
- 8 Коваленко Н. Д. Возмущения сверхзвукового потока при массотеплоподводе / Н. Д. Коваленко – Киев : Наук. думка, 1980. – 224 с.
- 9 Коваленко Г. Н. О влиянии размерности и степени расширения сопла ЖРД на полноту выделения энергии впрыскиваемой управляющей жидкости и создаваемые боковые силы / Г. Н. Коваленко // Техническая механика. – 2007. – №2. – С. 62 – 67.
- 10 Коваленко Н. Д. Влияние термогазодинамических параметров впрыскиваемой жидкости в сверхзвуковой поток на скорость и полноту выделения энергии при создании управляющих сил на обтекаемой поверхности / Н. Д. Коваленко, Г. А. Стрельников, Г. Н. Коваленко // Техническая механика. – 2007. – №1. – С. 99 – 109.
- 11 Грин Р. Управление вектором тяги путем инжекции жидкости / Р. Грин, Ф. Мак-Кулох // РТК. – 1963. – № 3. – С. 34 – 40.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 08.01.09,
в окончательном варианте 17.03.09