

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В ОТРЫВНЫХ ЗОНАХ

А.К. Тыныбеков

INTEGRATED METHOD OF CALCULATION OF THE FORCES OPERATING IN SEPARATED ZONES

УДК: 629.194.362: 629.196.3

В статье представлены результаты расчета боковых сил, возникающих при взаимодействии поперечной струи со сверхзвуковым потоком в сопле ракетного двигателя.

In article results of calculation of the lateral forces arising at interaction of a cross-section stream with a supersonic stream in a nozzle of the rocket engine are presented.

Практически все методики расчета боковых и осевых сил в сопле (рис.1), полученные на основании теоретических исследований, при использовании значительного количества эмпирических зависимостей остаются громоздкими для практического использования.

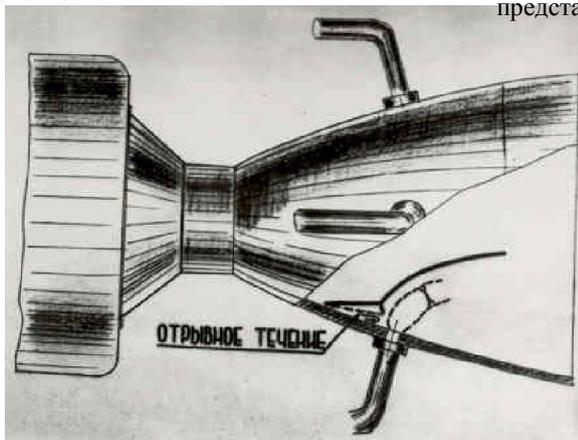


Рис.1.

Применительно к соплу Лавалья возникающие в нем газодинамические силы при несимметричной инжекции газа (жидкости) в сверхзвуковой поток разделят на отдельные составляющие, каждая из которых является проекцией указанных сил на координатные плоскости.

В общем случае в прямоугольной системе координат $oxyz$ (начала координат находится на стенке сопла в сечении, где расположены узлы вдува, ось x направлено параллельно оси сопла по направлению потока газа, ось y расположена в плоскости симметрии возмущенной зоны на поверхности сопла и проходит через ось Лавалья)

газодинамическая сила, возникающая при инжекции газа, определяется уравнением (рис.2).

$$P_{ВД} = \sqrt{P_{ВДx}^2 + P_{ВДy}^2 + P_{ВДz}^2} \quad (1)$$

где; $P_{ВДx} = P_{ВД} \cos \alpha_x \cos \alpha_z$ $P_{ВДy} = P_{ВД} \cos \alpha_y \cos \alpha_z$
 $P_{ВДz} = P_{ВД} \cos \alpha_z \cos \alpha_y$

Линия действия управляющего усилия определяется координатами точки пересечения вектора силы с поверхностью сопла и направляющими косинусами углов образуемых положительными направлениями осей координат с векторами так $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ называемой управляющей силой вдува.

Каждую проекцию силы вдува можно

представить в виде суммы двух слагаемых:

$$P_{ВДi} = \sqrt{P_{pi}^2 + P_{ai}^2} \quad (2)$$

где - реактивная составляющая i -й проекции; - активная составляющая (сила избыточного давления на стенке сопла) i -й проекции.

С учетом неперпендикулярности оси отверстия вдува к поверхности сопла (наиболее общий случай) соотношения для величины реактивной тяги принимают вид:

$$P_p = \sqrt{P_{p.c}^2 + P_p^2} \quad (3)$$

здесь - реактивная тяга сопла вдува без учета косога среза сопла:

$$P_p = \varepsilon(1) P_{0ВД} \mu_p S_{ВД} z(\lambda_{ВД}) \quad (4)$$

$$\varepsilon(1) = \left(\frac{2}{N_{ВД} + 1} \right)^{\frac{1}{N_{ВД} + 1}} z(\lambda_{ВД}) = \frac{1}{2} \left(\lambda_{ВД} + \frac{1}{\lambda_{ВД}} \right)$$

- дополнительная составляющая реактивной тяги сопла вдува от косога среза сопла:

$$\Delta P_p = P_{0ВД} \mu_p S_{ВД} t g \theta_{cp} \pi(\lambda_{cp}) \quad (5)$$

$$\pi(\lambda_{cp}) = \frac{\pi(1) + \pi(\lambda_2)}{2},$$

Здесь $S_{ВД}$ $S_{ВД}$ - площадь отверстия вдува и коэффициент расхода соответственно, θ_{cp} - угол косога среза сопла.

На основании обобщения имеющихся экспериментальных данных в данной статье предлагается методика расчета боковых и осевых сил [1]. Методика расчета основана на результатах весовых испытаний несимметричного вдува газа в сверхзвуковую часть сопла, и для расчета боковых и осевых сил в ней используются соотношения для коэффициентов боковых и осевых сил.

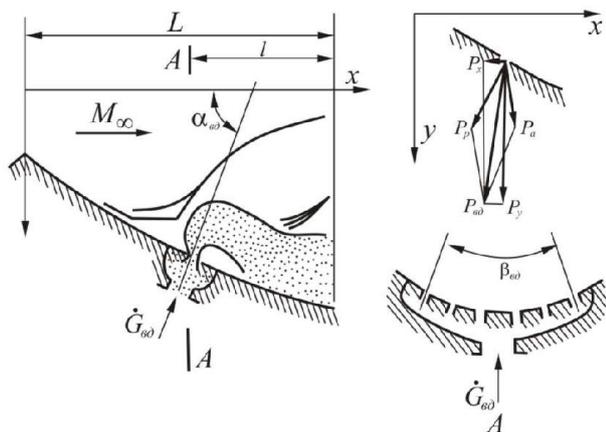


Рис. 2. Составляющие управляющего усилия.

Для расчета применяются интегральные соотношения для боковых и осевых сил:

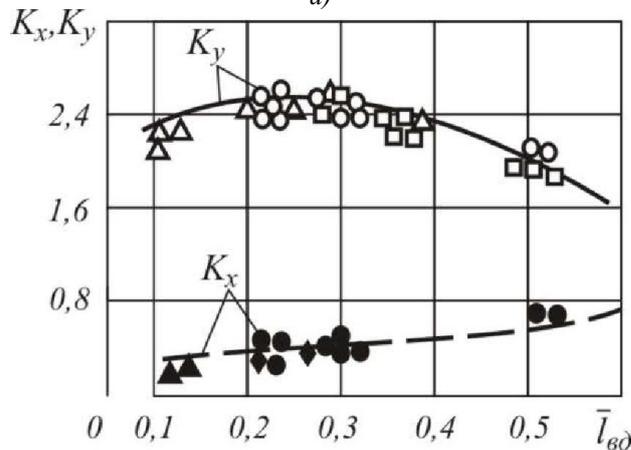
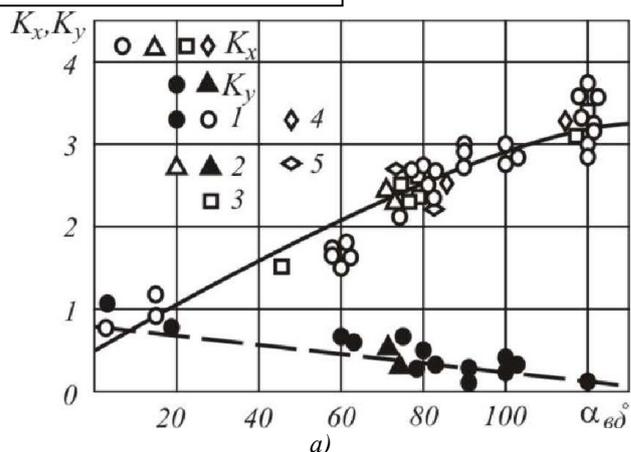
$$P_y = K_y I_{ВД} G_{ВД} \quad (6)$$

$$P_x = K_x I_{ВД} G_{ВД} \quad (7)$$

Величина характеризует энергетические свойства вдуваемого газа, коэффициенты и определяют конструктивное совершенство узла вдува и не зависят от свойств взаимодействующих потоков.

На рис.3 а) и рис.3 б) показаны зависимости коэффициентов и от угла вдува и расположения отверстий вдува по длине сопла, полученные в результате обработки экспериментальных данных при инъекции в высокотемпературный сверхзвуковой поток разных газов: восстановительного (большой избыток горючего, основной поток также с избытком горючего) с энергосодержанием меньшим и равным энергосодержанию основного потока; окислительного (большой избыток окислителя) с величиной равной 0,25 и 0,45; инертного (азот) с величиной =0,26.

Результаты исследований показывают, что тяга основного сопла, число Маха основного и вдуваемого потоков на срезах сопел и в сечении вдува основного сопла, количество отверстий вдува и профиль сопла незначительно влияют на коэффициенты боковых и осевых сил; основное влияние на величину этих сил оказывают энергетические свойства вдуваемого газа угол вдува газа в сопло, расположение сопел вдува по длине основного сопла и угол [1, 2, 3].



б) Рис.3.

а) Зависимость коэффициентов и от угла вдува газа при и :

1 - восстановительный газ, ; 2 - восстановительный газ, 1.0; 3 - окислительный газ, около 0.45; 4 - окислительный газ, около 0.25; 5 - азот, 0.26.

б) Зависимость коэффициентов и от расположения углов вдува по длине сопла вдуве разных углов газов (Обозначения те же, что на рис.2 а).

Для диапазонов определяющих параметров, получены эмпирические зависимости для коэффициентов боковых и осевых сил [1]. При этом установлено, что коэффициент боковых сил зависит от относительного объемного расхода вдуваемого газа. Упомянутая зависимость обусловлена нелинейностью зависимости боковых сил от расхода вдуваемого газа при определенных сочетаниях режимных и конструктивных параметров системы вдува.

В областях малых относительных расходов, когда влияние кривизны сопла на боковые силы мало, зависимость можно аппроксимировать уравнением

$$K_y = b_y \left[1 + \left(\frac{a_y}{b_y} - 1 \right) \frac{1}{1 + c_y^2} \right], \quad (8)$$

где a_y и b_y - экспериментальные коэффициенты.

Уравнение (6) с учетом (8) принимает вид

$$P_y = P_{P_{ВД}} \dot{G}_{ВД} b_y \left[1 + \left(\frac{a_y}{b_y} - 1 \right) \frac{1}{c_y^2(\%) + 1} \right] \quad (9)$$

Зависимости коэффициентов a_y и b_y от $\alpha_{ВД}$ при $\beta_{ВД} = 0^\circ$ представлены на рис.4 и могут быть аппроксимированы уравнениями

$$a_y = 0,75 + 1,3\alpha_{ВД}, \quad (10)$$

$$b_y = 0,6 + 1,6\alpha_{ВД} - 0,25\alpha_{ВД}^2. \quad (11)$$

На рис.5 приведены экспериментальные данные о влиянии величины $\bar{l}_{ВД}$ на коэффициенты боковых сил a_y и b_y , которые можно описать соответствующими эмпирическими зависимостями

$$a_y = 2,2 + 4,8\bar{l}_{ВД} - 9\bar{l}_{ВД}^2 \quad (12)$$

$$b_y = 1,4 + 6,5\bar{l}_{ВД} - 10\bar{l}_{ВД}^2 \quad (13)$$

Влияние величины $\beta_{ВД}$ на коэффициент a_y и показано на рис.6; аналитически это можно представить в виде (для $\alpha_{ВД} = 0^\circ$)

$$a_y = 2,8(1 - 0,05\beta_{ВД}^2) \quad (14)$$

$$b_y = 2,4(1 - 0,05\beta_{ВД}^2) \quad (15)$$

Строго говоря, зависимости a_y и b_y будут разными для различных углов $\alpha_{ВД}$, однако, как показали исследования, отличие это невелико и его можно не учитывать.

Окончательно уравнения для коэффициентов боковых сил имеют вид

$$a_y = 0,35(0,75 + 1,3\alpha_{ВД}) \left(2,2 + 4,8\bar{l}_{ВД} - 9\bar{l}_{ВД}^2 \right) (1 - 0,05\beta_{ВД}^2) \quad (16)$$

$$b_y = 0,45(0,6 + 1,6\alpha_{ВД} - 0,25\alpha_{ВД}^2) \left(1,4 + 6,5\bar{l}_{ВД} - 10\bar{l}_{ВД}^2 \right) (1 - 0,05\beta_{ВД}^2) \quad (17)$$

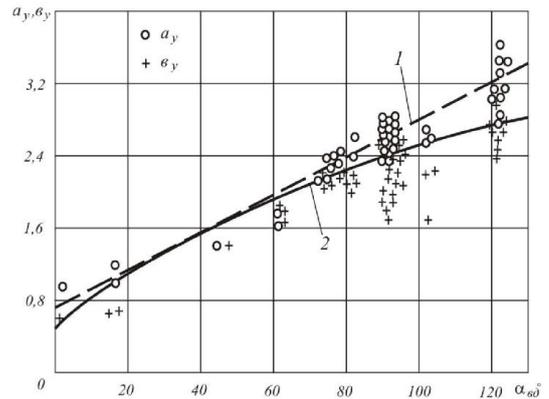


Рис.4. Зависимость коэффициентов a_y и b_y от угла вдува газа в сопло:

$$1 - a_y = 2,2 + 1,3\alpha_{ВД}$$

$$2 - b_y = 0,6 + 1,6\alpha_{ВД} - 0,25\alpha_{ВД}^2$$

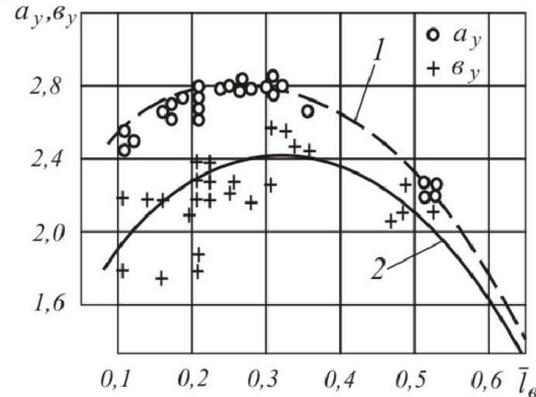


Рис.5. Зависимость коэффициентов a_y и b_y от расположения отверстий вдува по длине сопла:

$$1 - a_y = 2,2 + 4,8\bar{l} - 9\bar{l}^2$$

$$2 - b_y = 1,4 + 6,5\bar{l} - 10\bar{l}^2$$

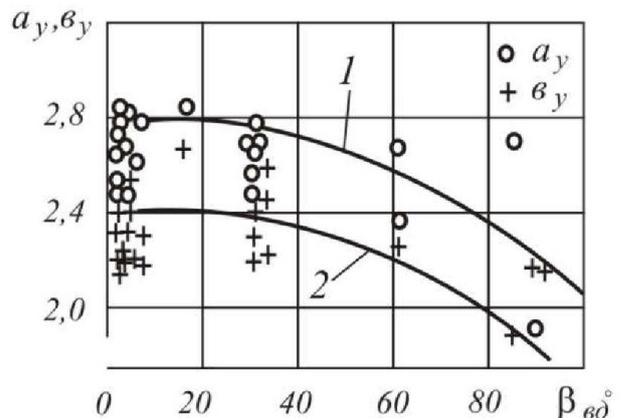


Рис.6. Зависимость коэффициентов a_y и b_y от угла сектора вдува:

$$1 - a_y = 2,8(1 - \beta_{вд}^2)$$

$$2 - b_y = 2,4(1 - \beta_{вд}^2)$$

Как следует из экспериментальных данных, зависимость осевых сил от расхода газа на вдув в исследованном диапазоне близка к линейной, поэтому можно принять, не зависящим от . Согласно рис.3 а) и рис.3 б), зависимости можно аппроксимировать уравнениями

$$K_x = f(\alpha_{вд}), K_x = f(I_{вд}) \text{ для ,}$$

$$\alpha_{вд} = 80 K_x = 0,3(1 + 4I_{вд}^2) \quad (18)$$

$$\text{для } K_x = 0,8(1 + 4\alpha_{вд}^2) I_{вд} = 0,25 \quad (19)$$

Принимая, как и для зависимости примерно одинаковыми для всех значений получаем

$$K_x = 0,65(1 - 0,4\alpha_{вд}) (1 + 4I_{вд}^2) \quad (20)$$

В диапазоне 0 угол сектора вдува практически не влияет на величину осевых сил при отсутствии химического взаимодействия потоков.

Уравнение для осевых сил получим в виде

$$P_x = I_{P,вд} \dot{G}_{вд} 0,65(1 - 0,4\alpha_{вд}) (1 + 4I_{вд}^2) \quad (21)$$

Эффективность создания боковых сил характеризуется комплексом (энергетические свойства вдуваемого газа) и конструктивным совершенством узла вдува (коэффициенты):

$$P_{удд} = I_{вд} K_y \quad (22)$$

$$P_{удд} = I_{вд} K_x \quad (23)$$

Коэффициенты боковых и осевых сил практически от параметров вдуваемого газа не зависят (рис.7), поэтому использование их для оценки эффективности создания боковых сил позволяет все расходные характеристики, полученные в разных условиях со вдувом разных газов, свести в стройную систему зависимости коэффициентов вдува от геометрических параметров сопел вдува и основного сопла.

Учитывая, что

$$I_{вд} = \frac{\sqrt{R_{вд} T_{0вд}}}{A_{п}} = \frac{P_{0вд} F_{кр.вд}}{\dot{G}_{вд}}$$

$$A_{п} = \sqrt{\kappa_{вд} g} \left(\frac{2}{\kappa_{вд} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{вд} + 1}{2(\kappa_{вд} - 1)}}$$

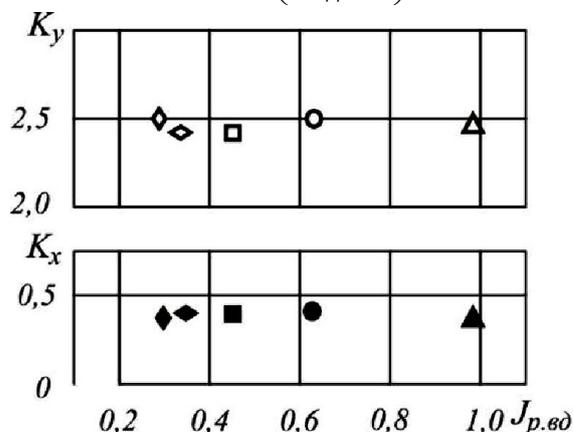


Рис.7. Экспериментальные данные по вдуву в сопло Лавая разных газов.

окончательно для боковых и осевых сил получаем следующие уравнения:

$$P_x = (\kappa_{вд} g)^{-0,5} \left(\frac{2}{\kappa_{вд} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{вд} + 1}{2(1 - \kappa_{вд})}} \sqrt{R_{вд} T_{0вд}} \dot{G}_{вд} b_y \left[1 + \left(\frac{a_y}{b_y} - 1 \right) \frac{1}{c_y^2(\%) + 1} \right] \quad (24)$$

$$P_y = (\kappa_{вд} g)^{-0,5} \left(\frac{2}{\kappa_{вд} + 1} \right)^{\frac{\kappa_{вд} + 1}{2(1 - \kappa_{вд})}} \sqrt{R_{вд} T_{0вд}} \dot{G}_{вд} 0,65(1 - 0,4\alpha_{вд}) (1 + 4I_{вд}^2) \quad (25)$$

Значительными преимуществами данного метода расчета являются простота вычислений и сравнительно высокая точность расчета, возможность учета влияния основных характеристик и параметров системы вдува. Параметры, определяющие величину бокового усилия, можно определить из экспериментальных исследований.

Литература:

1. Коваленко Н.Д., Стрельников Г.А., Животов А.И. Управляющие усилия, возникающие при несимметричной инжекции газа в сверхзвуковую часть сопла с целью регулирования вектора тяги. Косм.исслед. на Украине, 1975, вып. 7, с. 10-13.
2. Тыныбеков А.К. Исследование струйных отрывных течений. Бишкек, Изд-во Кыргызско-Российского Славянского университета, 2007, 146 стр.
3. Тыныбеков А.К., Орозалиев Т.С. Экспериментальные методы исследований сверхзвуковых течений. Бишкек. Изд-во КРСУ, 2008, с. 228.