

## МЕХАНИКА

УДК 531.554

DOI 10.17223/19988621/54/5

**В.И. Биматов, И.А. Бородачева, А.Н. Лавронович**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ВЫБРОСА КОМПОНУЮЩЕГО ТЕЛА РАЗДЕЛЯЮЩЕЙСЯ СОСТАВНОЙ СИСТЕМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ**

Исследования посвящены решению задачи направленного выброса компонентующего тела из контейнера разделяющейся составной системы при сверхзвуковых скоростях движения под действием аэродинамических сил. Установлены критериальные зависимости, указывающие на направление выброса компонентующего тела из контейнера. Данные критериальные зависимости могут быть использованы при конструировании элементов составных систем и по их массово-геометрическим и аэродинамическим характеристикам прогнозировать требуемые направления разделения составных систем.

**Ключевые слова:** *разделяющаяся составная система, компонентующее тело, аэродинамические характеристики, критериальные зависимости.*

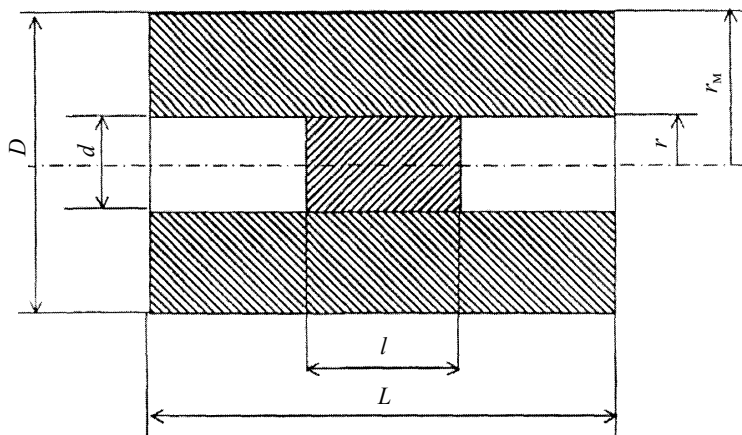
Класс составных систем (СС) представляет собой набор тел, имеющих обычно сгруппированные массовые, геометрические и аэродинамические характеристики. Будем рассматривать способ компоновки, предполагающий расположение компонентующих тел (КТ) так, что их продольные оси образуют продольную ось СС.

Наиболее приемлемым путем получения полной и достоверной информации о влиянии сверхзвуковых отрывных течений на обтекание и аэродинамические характеристики (АДХ) разделяющихся СС является сочетание экспериментальных методов исследования на баллистических трассах, в сверхзвуковых аэродинамических установках, на полигонах с теоретическим анализом выбранных моделей отрывного обтекания КТ, механизма разделения и рассеивания СС под действием аэродинамических сил [1–4].

Для экспериментального исследования динамики совместного движения КТ составных систем необходимо прогнозировать закономерности их разделения на баллистической трассе и гарантировано задавать направление разделения. В статье представлена модель разделения компонентующих тел составной системы и методика получения критериальных зависимостей, позволяющих на основе сравнения ускорений компонентующих тел СС определить направление их разделения.

#### **Модель составной системы, методика получения критериальных зависимостей и результаты решения задачи**

Для установления критериальных зависимостей, указывающих на направление выброса КТ из контейнера, рассмотрим разделяющуюся СС (рис. 1), моделирующую контейнеры с находящимися в них КТ, применяемые при проведении баллистических экспериментов.



**Рис. 1.** Контейнер с отделяющимся телом в сквозном осевом канале  
**Fig. 1.** Container with a separable body in a through axial channel

Разделяющаяся СС состоит из двух частей: контейнера и выбрасываемого КТ. Контейнер представляет собой цилиндр диаметром  $D = 2r_M$  и длиной  $L$  с плоским передним и задним торцами, имеющий цилиндрический осевой канал диаметром  $d$ . В канале расположено выбрасываемое КТ, представляющее собой также цилиндр диаметром  $d$  и длиной  $l$ . Известны плотности материалов контейнера  $\rho_k$  и КТ  $\rho_t$ . Ограничимся случаем сверхзвукового движения разделяющейся СС с углом атаки  $\alpha = 0$ .

Составляющую продольной аэродинамической силы, действующую на передний торец системы, определим выражением

$$R_x = \frac{4q_\infty}{kM_\infty^2} \pi r_M^2 \int_0^1 (f(\bar{r}) - 1) \bar{r} dr. \quad (1)$$

Здесь  $\bar{r} = r/r_M$ ,  $r_M$  – радиус миделевого сечения,  $f(\bar{r}) = P_t/P_\infty$ ,  $P_t$  – давление на выбранной площади элемента поверхности,  $P_\infty$  – давление невозмущенного потока,  $r$  – текущий радиус.

Разделим составляющую  $R_x$  на силу, действующую на торец контейнера  $R_x^k$  и на силу, действующую на выбрасываемое КТ –  $R_x^t$ :

$$R_x^k = \frac{4q_\infty}{kM_\infty^2} \pi r_M^2 \int_{\bar{r}_1}^1 (f(\bar{r}) - 1) \bar{r} dr; \quad (2)$$

$$R_x^t = \frac{4q_\infty}{kM_\infty^2} \pi r_M^2 \int_0^{\bar{r}_1} (f(\bar{r}) - 1) \bar{r} dr. \quad (3)$$

Аэродинамические коэффициенты этих сил  $C_x$ ,  $C_x^k$  и  $C_x^t$  выражаются в виде

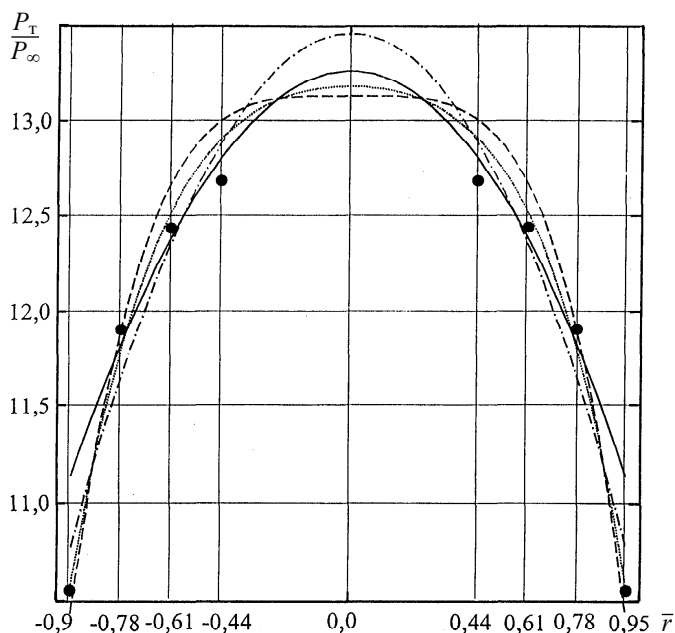
$$C_x = \frac{4}{kM_\infty^2} \int_0^1 (f(\bar{r}) - 1) \bar{r} dr; \quad (4)$$

$$C_x^{\kappa} = \frac{4}{kM_{\infty}^2} \int_{\bar{r}_1}^1 (f(\bar{r}) - 1) \bar{r} d\bar{r}; \quad (5)$$

$$C_x^{\tau} = \frac{4}{kM_{\infty}^2} \int_0^{\bar{r}_1} (f(\bar{r}) - 1) \bar{r} d\bar{r}, \quad (6)$$

где  $\bar{r}_1 = \frac{d}{2r_m}$  – безразмерный радиус сквозного осевого канала.

Для дальнейших исследований в качестве функции  $f(\bar{r})$  будем использовать полином четвертой степени, построенный по результатам дренажных испытаний при скорости набегающего потока  $M_{\infty} = 3$  [1, 5], который был вычислен по девяти точкам (с учетом точки Релея) (рис. 2).



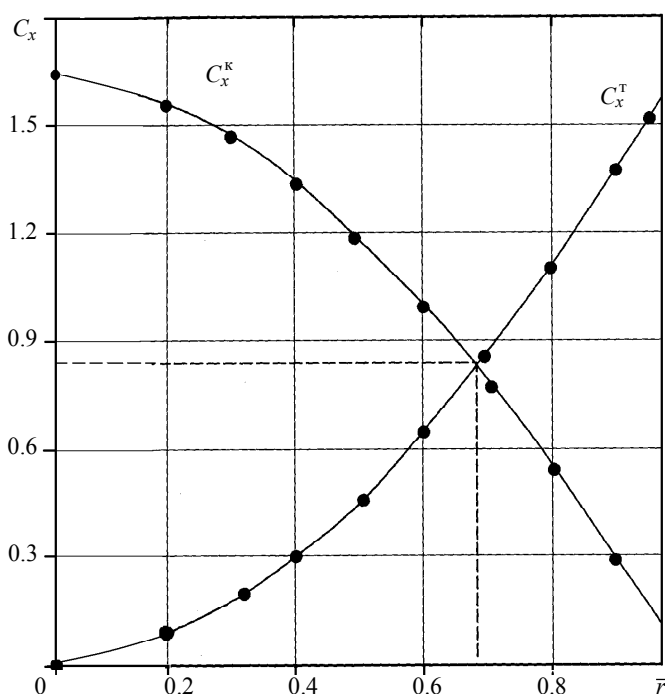
**Рис. 2.** Аппроксимация экспериментальных данных распределения относительно давления  $P_t/P_{\infty}$  по переднему торцу компонующего тела с помощью многочленов второй и четвертой степени,  $\alpha = 0$ ,  $M_{\infty} = 3$ ; — уравнение второй степени; - - - уравнение четвертой степени; - · - · - уравнение второй степени с учетом точки  $\bar{r} = 0$ ; ..... уравнение четвертой степени с учетом точки  $\bar{r} = 0$

**Fig. 2.** Approximation of experimental distribution data with respect to the pressure  $P_t/P_{\infty}$  along the front end of linked body using the quadratic and quartic polynomials at  $\alpha = 0$  and  $M_{\infty} = 3$ ; — is for quadratic equation; - - - is for quartic equation; - · - · - is for quadratic equation with allowance for the point  $\bar{r} = 0$ ; and ..... is for quartic equation with allowance for the point  $\bar{r} = 0$

Вид этого полинома

$$\frac{P}{P_{\infty}} = f(\bar{r}) = 12.8138 - 0.1124 \bar{r}^{2.2} - 2.5895 \bar{r}^4. \quad (7)$$

Расчет по формулам (4), (5) и (6) с учетом (7) позволяет определить общий аэродинамический коэффициент продольной силы  $C_x$ , действующей на разделяющую СС, а также зависимость аэродинамических коэффициентов продольной силы, действующей на контейнер  $C_x^k$  и выбрасываемое КТ  $C_x^t$  от  $\bar{r}$ . На рис. 3 представлены эти зависимости. Пересечение кривых позволяет определить точку, в которой значения  $C_x^k$  и  $C_x^t$  равны между собой. Эта точка соответствует значению  $\bar{r} = 0,68$ . При этом значения  $C_x^k = C_x^t = 0.825$ ,  $C_x = 1.65$ .



**Рис. 3.** Зависимость аэродинамических коэффициентов продольной силы, действующей на контейнер  $C_x^k$  и выбрасываемое компонентное тело  $C_x^t$  от  $\bar{r}$   
**Fig. 3.** Aerodynamic coefficients of the axial force acting on the container  $C_x^k$  and ejected linked body  $C_x^t$  as the functions of  $\bar{r}$

Для нахождения критериальных зависимостей, позволяющих определить направление выброса КТ из контейнера, рассмотрим отношение их ускорений:

$$\frac{a_k}{a_t} = \frac{C_x^k}{C_x^t} \cdot \frac{m_t}{m_k}, \quad (8)$$

где  $m_t$  и  $m_k$  – массы КТ и контейнера соответственно.

Разделение СС произойдет при выполнении условия

$$\frac{a_k}{a_t} \neq 1. \quad (9)$$

Если соотношение  $\frac{a_k}{a_t} > 1$ , то выброс КТ будет происходить по направлению, совпадающему с вектором скорости (выброс через головную часть контейнера).

При  $\frac{a_k}{a_t} < 1$  будет происходить выброс в донную область контейнера.

Значение для масс контейнера и КТ запишутся соответственно

$$m_k = \rho_k W_k = \pi \rho_k (r_k^2 - r^2) L; \quad (10)$$

$$m_t = \rho_t W_t = \pi \rho_t r^2 l. \quad (11)$$

Подставляя значения из (10) и (11) в (8) и учитывая, что  $\bar{r} = \frac{r}{r_m}$ ,  $\bar{L} = \frac{L}{D}$  и

$\bar{l} = \frac{l}{D}$ , получим

$$\frac{a_k}{a_t} = \frac{C_x^k}{C_x^t} \cdot \frac{\bar{r}^2}{(1 - \bar{r}^2)} \cdot \frac{\rho_t}{\rho_k} \cdot \frac{\bar{l}}{\bar{L}}. \quad (12)$$

Для анализа (12) предположим, что выбрасываемое КТ имеет ту же длину, что и контейнер, т.е.  $l = L$ . Тогда

$$\frac{a_k}{a_t} = \frac{C_x^k}{C_x^t} \cdot \frac{\bar{r}^2}{(1 - \bar{r}^2)} \cdot \frac{\rho_t}{\rho_k}. \quad (13)$$

Из (13) видно, что  $\frac{a_k}{a_t}$  является функцией, зависящей от  $\bar{r}$  и от плотностей разделяющихся тел. Задавая плотность тел, можно определить, произошел выброс КТ в донную область или через головную часть контейнера при заданном  $\bar{r}$  и  $M_\infty$ . Обозначая

$$\frac{C_x^k}{C_x^t} \cdot \frac{\bar{r}^2}{(1 - \bar{r}^2)} = F(\bar{r}) \quad (14)$$

и учитывая отношение  $\frac{\bar{l}}{\bar{L}} = n$ , выражение (12) можно записать в виде

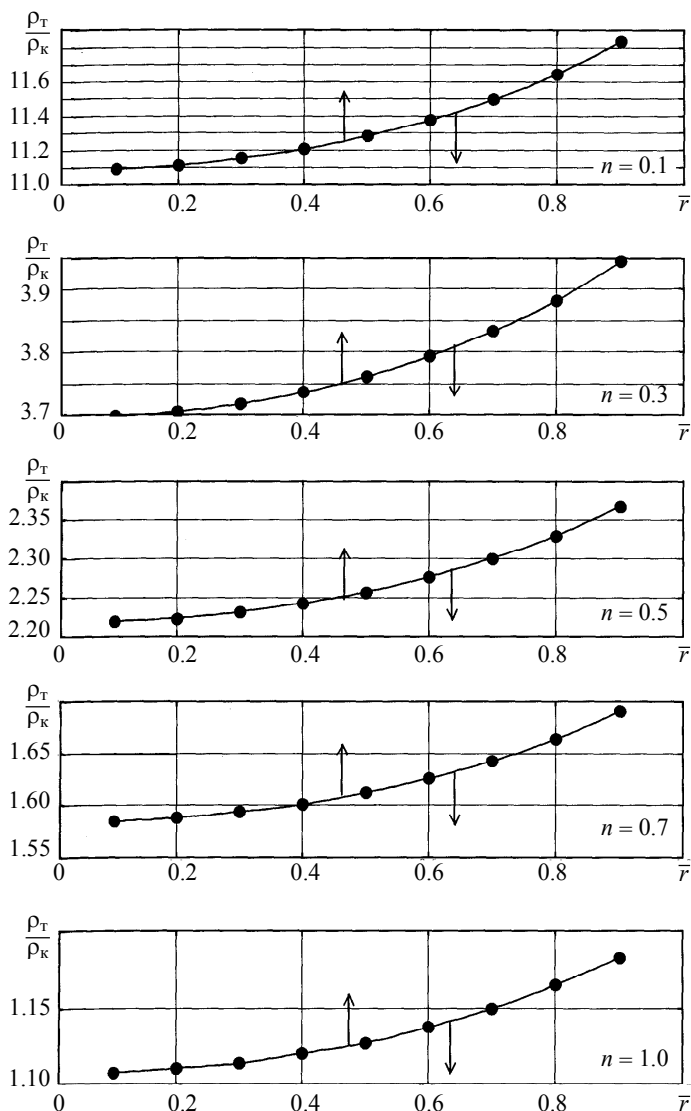
$$\frac{a_k}{a_t} = F(\bar{r}) \frac{\rho_t}{\rho_k} n. \quad (15)$$

Расчеты, проведенные для  $M_\infty = 3$ , позволяют построить критериальные кривые разделения составной системы (рис. 4).

На самой кривой  $\frac{\rho_t}{\rho_k} = \frac{1}{F(\bar{r})n}$ , т.е. выбрасываемое КТ и контейнер движутся вместе и разделения не происходит.

Если соблюдаются условие  $\frac{\rho_T}{\rho_K} > \frac{1}{F(\bar{r})n}$ , значения  $\frac{\rho_T}{\rho_K}$  лежат выше кривой и происходит выброс КТ через головную часть контейнера.

При  $\frac{\rho_T}{\rho_K} < \frac{1}{F(\bar{r})n}$  выброс КТ произойдет в донную область (рис. 4).



**Рис. 4.** Критериальная зависимость, характеризующая направление выброса компонующего тела из контейнера. ↓ – выброс в донную область, ↑ – выброс навстречу набегающему потоку

**Fig. 4.** Criteria dependency characterizing a direction of the linked body ejection from the container. ↓ indicates the ejection towards the bottom area, ↑ indicates the ejection towards the oncoming flow

## Выводы

Методика получения критериальных зависимостей, предложенная в работе, позволяет получить однозначный ответ о направлении разделения составляющих тел составной системы: выброс через головную часть контейнера или выброс в донную область контейнера. Данные критериальные зависимости могут быть использованы при конструировании элементов составных систем и по их массово-геометрическим и аэродинамическим характеристикам прогнозировать требуемые направления разделения составных систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2145067. Баллистический способ определения коэффициента лобового сопротивления тела / В.К. Якушев, В.И. Биматов, Р.Г. Николаев. Опубл. Б.И. № 327.01.2000.
2. Хлебников В.С. Осесимметричное обтекание пары тел сверхзвуковым потоком газа // Уч. записки ЦАГИ. 1978. Т. 9. № 6. С. 108.
3. Хлебников В.С. Картина сверхзвукового обтекания пары тел и перестройка течения между ними // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 1. С.158–165.
4. Хлебников В.С. Исследование обтекания пары тел при транс- и сверхзвуковых режимах // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1998. № 2. С.158–163.
5. Биматов В.И., Якушев В.К., Николаев Р.Г. Применение эффекта группового движения тел для определения коэффициента лобового сопротивления // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады Всероссийской научной конференции. Томск, 1998. С. 179–180.

Статья поступила 28.04.2018 г.

Bimatov V.I., Borodacheva I.A., Lavronovich A.N. (2018) RESEARCH OF A DIRECTED EMISSION OF LINKED BODY OF THE SEPARABLE COMPOUND SYSTEM UNDER THE ACTION OF AERODYNAMIC FORCES. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 54. pp. 58–65

DOI 10.17223/19988621/54/5

Keywords: separable compound system, linked body, aerodynamic characteristics, criteria dependencies.

The studies are devoted to solving the problem of directed ejection of a linked body from a container of the separable compound system at supersonic speeds under the action of aerodynamic forces. The considered separable compound system consists of two parts which are the container and the ejected linked body. The container represents a cylinder with a flat front and rear ends with a cylindrical axial channel inside. There is an ejected linked body in the channel, which is also a cylinder of the same diameter as the axial channel. The densities of the materials of container and linked body are known. The criterial dependencies indicating the direction of the linked body ejection from the container are obtained. These criterial dependencies can be used when designing elements of compound systems and, based on the mass, geometric, and aerodynamic characteristics of the systems, they can predict the required directions of the separation of compound systems.

*BIMATOV Vladimir Ismagilovich* (Doctor of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vbimatov@mail.ru

*BORODACHEVA Irina Aleksandrovna* (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: i.revenko@mail.ru

LAVRONOVICH Aleksey Nikolaevich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).  
E-mail: vbimatov@mail.ru

## REFERENCES

1. Yakushev V.K., Bimatov V.I., Nikolayev R.G. (2000) *Ballisticheskiy sposob opredeleniya koeffitsienta lobovogo soprotivleniya tela* [Ballistic method of determining the drag coefficient of a body]. RF Patent 2145067.
2. Khlebnikov V.S. (1978) Osesimmetrichnoe obtekanie pary tel sverkhzvukovym potokom gaza [Axisymmetric flow around a pair of bodies by a supersonic gas flow]. *TsAGI Science Journal*. 9(6). P. 108.
3. Khlebnikov V.S. (1994) Kartina sverkhzvukovogo obtekaniya pary tel i perestroyka techeniya mezhdru nimi [The picture of supersonic flow around a pair of bodies and the restructuring of the flow between them]. *Izvestiya RAN, Mekhanika Zhidkosti i Gaza – Fluid Dynamics*. 1. pp. 158–165.
4. Khlebnikov V.S. (1998) *Issledovanie obtekaniya pary tel pri trans- i sverkhzvukovykh rezhimakh* [Investigation of the flow around a pair of bodies under trans- and supersonic regimes]. *Izvestiya RAN, Mekhanika Zhidkosti i Gaza – Fluid Dynamics*. 2. pp. 158–163.
5. Bimatov V.I. Yakushev V.K., Nikolayev R.G. (1998) Primenenie effekta gruppovogo dvizheniya tel dlya opredeleniya koeffitsienta lobovogo soprotivleniya [Application of the effect of group motion of the bodies for determining the drag coefficient]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki: Doklady Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii – Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics. Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. pp. 179–180.