

01;03

Применение МГД систем на гиперзвуковых летательных аппаратах

© В.Л. Фрайштадт, А.Л. Куранов, Е.Г. Шейкин

Открытое акционерное общество "Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем",
196066 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 28 июля 1997 г.)

Обсуждены возможности применения магнитогидродинамических (МГД) систем на гиперзвуковых летательных аппаратах. Рассмотрены особенности использования МГД систем в тракте гиперзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя. Представлена математическая модель двигателя в квазиодномерном приближении, реализующего МГД воздействие на поток. Показано, что использование МГД систем позволяет повысить удельный импульс двигательной установки.

Реализация гиперзвуковых скоростей полета в атмосфере сопряжена с появлением экстремальных силовых и тепловых воздействий на конструкцию летательного аппарата. При определенных условиях полета возможно появление плазменной "оболочки" вокруг летательного аппарата, что приводит к принципиально новому по сравнению с традиционной аэродинамикой взаимодействию летательного аппарата с окружающей средой. В этих условиях возможно эффективное использование магнитогидродинамического объемного воздействия на высокоскоростной ионизированный поток с целью создания управляющих моментов, уменьшения тепловых потоков на поверхность летательного аппарата, управления структурой течения [1]. В данной работе будут рассмотрены некоторые особенности использования МГД систем в тракте гиперзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя [2] на примере разрабатываемого в рамках концепции АЯКС [3] магнитоплазмохимического двигателя (МПХД). Традиционная схема гиперзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД) обладает рядом принципиальных недостатков, существенно ограничивающих диапазон его применимости. Сложная структура течения в тракте ГПВРД повышает вероятность отрыва потока, приводящего к запырению канала, затрудняет организацию эффективного сжигания топлива в камере сгорания (см., например, [4]). При скоростях полета, меньших расчетной, для воздухозаборника ГПВРД характерны снижение коэффициента расхода воздуха и уменьшение степени поджатия потока. При изменении скорости гиперзвукового летательного аппарата существенно перестраивается структура течения в тракте ГПВРД. Совокупность этих проблем приводит к тому, что ГПВРД эффективен только в небольшом диапазоне скоростей полета.

Для того чтобы расширить диапазон работы ГПВРД, необходимо ввести дополнительный механизм воздействия на поток, который позволит осуществить дополнительное поджатие потока в воздухозаборнике, регулировать структуру течения, препятствовать развитию отрывных течений. Одним из наиболее перспективных способов дополнительного воздействия на сверх- и гиперзвуковой поток в тракте прямооточной двигательной

установки является объемное воздействие с использованием МГД систем. На рис. 1 приведена упрощенная схема МПХД, реализующего эти принципы и являющегося по сути гиперзвуковым прямооточным воздушно-реактивным двигателем с введенными в его тракт МГД системами. Кратко рассмотрим функциональное назначение основных подсистем МПХД, отличающих его от ГПВРД. Внешний МГД генератор используется для управления профилем потока, регулирования расхода воздуха в тракте МПХД и повышения давления. Внутренний МГД генератор используется для повышения давления и предотвращения развития отрывных течений. Ионизатор используется для создания необходимой проводимости потока в том случае, когда естественная проводимость потока не обеспечивает требуемой степени МГД взаимодействия. Электроэнергия, которую вырабатывают МГД генераторы, расходуется на обеспечение энергетических потребностей ионизатора, бортового оборудования и обеспечение дополнительного ускорения продуктов сгорания в МГД ускорителе.

Проанализируем схему МПХД с внутренним МГД генератором и МГД ускорителем. Для наглядности рассмотрение проведем в наиболее простых предположениях. Используется квазиодномерное приближение в модели невязкого, нетеплопроводного идеального газа с постоянной теплоемкостью. Для описания МГД течений используется подход, развитый в работах [5,6] для анализа сложных систем, включающих в себя МГД системы. Кратко рассмотрим особенности данного подхода. Формально предположив, что градиент давления в МГД канале пропорционален силе, действующей на поток со стороны магнитного поля, введем коэффициент пропорциональности ξ . Для фарадеевского идеально секционированного МГД канала предполагаем следующее соотношение:

$$\frac{dp}{dx} = \xi(x)(1-k)^2\sigma B^2v, \quad (1)$$

где p — статическое давление в потоке, v — скорость потока, x — продольная пространственная координата, k — коэффициент нагрузки, σ — проводимость потока, B — магнитная индукция.

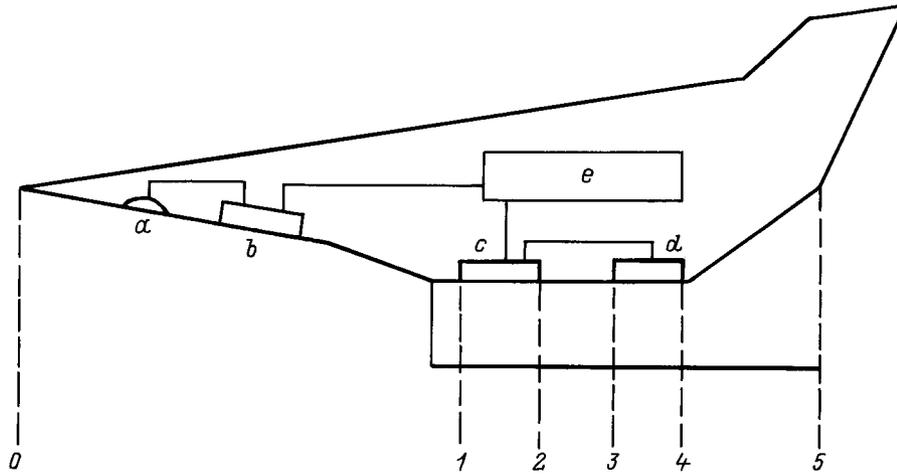


Рис. 1. Упрощенная схема магнитоплазмохимического двигателя: 0–1 — воздухозаборник, 1–2, c — внутренний МГД генератор, 2–3 — камера сгорания, 3–4, d — МГД ускоритель, a — ионизатор, b — внешний МГД генератор, e — бортовые системы.

Если ограничиться классом решений, для которых величина ξ постоянна, то, используя соотношение (1), удастся получить простые аналитические выражения для параметров на выходе МГД канала. Соответствующий режим течения условно называется режим течения $\xi = \text{const}$. Изменение параметров течения в МГД канале описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= 1 + \frac{1-k}{k} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right) (1 + \xi) \eta, \\ \frac{v_2}{v_1} &= \sqrt{1 - \frac{1 + \xi(1-k)}{k} G \eta}, \\ \frac{p_2}{p_1} &= \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\xi}{\xi+1}}, \quad G = \frac{2 + (\gamma-1) M_1^2}{(\gamma-1) M_1^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь T — температура, M — число Маха, γ — показатель адиабаты, η — коэффициент преобразования энтальпии потока в электроэнергию, индексом 1 отмечены значения параметров на входе в МГД канал, 2 — на выходе. Режим течения $\xi = \text{const}$ включает в себя как частный случай часто рассматриваемые режимы течения, характеризующиеся сохранением одного из параметров течения. В таблице приведены значения параметра ξ , отвечающие этим режимам.

Режим течения	Значение параметра ξ , соответствующие данному режиму течения
$\rho = \text{const}$	$\xi = \gamma - 1$
$p = \text{const}$	$\xi = 0$
$T = \text{const}$	$\xi = -1$
$M = \text{const}$	$\xi = - \left[1 + \frac{2}{(1-k)(\gamma-1)M_1^2} \right] \frac{1}{G}$
$v = \text{const}$	$\xi = -1/(1-k)$

При анализе магнитоплазмохимического двигателя с внутренним МГД генератором будем использовать следующие нижние индексы для обозначения параметров: 0 — параметры набегающего потока, 1 — параметры на входе МГД генератора, 2 — параметры на входе в камеру сгорания, 3 — параметры на входе в МГД ускоритель, 4 — параметры на входе в реактивное сопло, 5 — параметры на выходе сопла (естественно, выходные параметры подсистемы являются входными параметрами для расположенной за ней подсистемой).

В данной работе ограничимся рассмотрением случая, когда проводимость потока обеспечивается без использования ионизатора. Рассмотрим подсистемы МПХД и определим соотношения между параметрами на входе и выходе системы.

Воздухозаборник включает в себя внешнюю часть, реализующую сжатие набегающего потока в системе косых скачков уплотнения, и внутреннюю (изолятор), обеспечивающую обратный разворот потока и дополнительное сжатие потока. Используются следующие характеристики: N — число скачков уплотнения во внешней части, Θ_N — суммарные разворот потока в воздухозаборнике, σ_{in} — коэффициент восстановления полного давления в воздухозаборнике. Если температура на выходе воздухозаборника (входе МГД генератора) принимает значение T_1 , то изменение давления и скорости в этой подсистеме определяются следующими соотношениями:

$$\frac{p_1}{p_0} = \sigma_{\text{in}} \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad \frac{v_0^2}{2} + c_p T_0 = \frac{v_1^2}{2} + c_p T_1, \quad (3)$$

где c_p — удельная теплоемкость воздуха.

МГД генератор характеризуется параметрами ξ_1 , k_1 и коэффициентом преобразования энтальпии η . Изменение параметров течения в канале МГД генератора

определяется следующим образом:

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{1 - k_1}{k_1} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right) (1 + \xi_1) \eta, \quad (4)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\xi_1}{\xi_1+1}}.$$

Рассмотрим камеру сгорания, работающую в режиме постоянного давления. Так как массовый расход топлива обычно много меньше массового расхода воздуха, то подвод топлива в камеру сгорания будем рассматривать как тепловыделение без ввода массы. При этом изменение параметров течения в камере сгорания имеет наиболее простой вид [2]

$$T_3 = T_2 + \Delta T, \quad p_3 = p_2, \quad \Delta T = \frac{H_u}{c_p(\alpha L_0 + 1)}, \quad (5)$$

где H_u — теплотворная способность топлива, L_0 — стехиометрический коэффициент, α — коэффициент избытка воздуха.

МГД ускоритель характеризуется параметрами ξ_3, k_3 . Предполагается, что вся энергия выработанная МГД генератором передается МГД ускорителю. Изменение параметров течения в канале МГД ускорителя определяется следующим образом:

$$\frac{T_4}{T_3} = 1 + \frac{k_3 - 1}{k_3} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right) \frac{T_1}{T_3} (1 + \xi_3) \eta, \quad (6)$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\xi_3}{\xi_3+1}}.$$

Предполагаем, что течение в сопле изоэнтропическое. При этом относительное изменение давления потока связано с относительным изменением температуры соотношением

$$\frac{p_5}{p_4} = \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (7)$$

При расчетном истечении из сопла систему уравнений (3)–(7) можно замкнуть, полагая, что давление на срезе сопла совпадает с давлением в окружающей среде $p_5 = p_0$. С учетом этого соотношения из системы уравнений (3)–(7) получаем следующую формулу для расчета температуры потока на срезе сопла:

$$T_5 = \frac{T_4}{\sigma_{in}^{(1-1/\gamma)} \left[\frac{T_1}{T_0} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\xi_1}{\xi_1+1}} \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{\xi_3}{\xi_3+1}} \right]}. \quad (8)$$

Скорость истечения газа из сопла определяется через температуру T_5 с использованием закона сохранения энергии

$$v_5 = \sqrt{v_0^2 + 2c_p(T_0 + \Delta T - T_5)}. \quad (9)$$

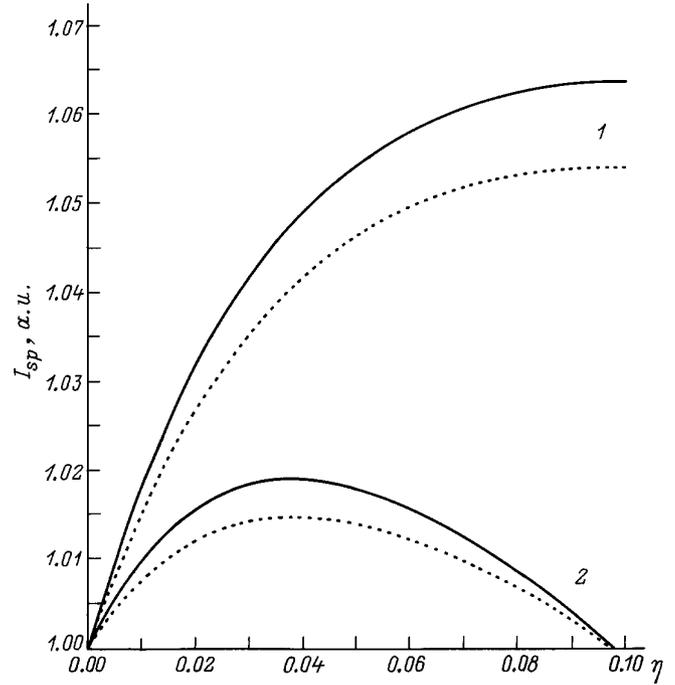


Рис. 2. Зависимость удельного импульса МПХД от коэффициента преобразования энтальпии потока в электроэнергию: $\Theta_N = 0.2 \text{ rad}$, $k_1 = 0.5$, $k_3 = 2$; $M_0 = 6 (1)$, $8 (2)$; сплошные кривые — $\varphi = 0.95$, пунктир — $\varphi = 1$.

Полученные соотношения позволяют определить удельный импульс МПХД I_{sp} . Пренебрегая массовым расходом топлива по сравнению с расходом воздуха, получим, согласно [7],

$$I_{sp} = \frac{\alpha L_0}{g} (\varphi v_5 - v_0), \quad (10)$$

где g — ускорение свободного падения; φ — коэффициент, учитывающий неидеальность сопла.

В тех случаях, когда это особо не оговорено, будем полагать $\varphi = 1$.

Совокупность формул (3)–(10) позволяет рассчитать удельный импульс МПХД при заданных параметрах воздухозаборника, МГД систем и камеры сгорания. При этом величина удельного импульса зависит от большого числа параметров: $\alpha, L_0, M_0, T_1, \sigma_{in}, k_1, \xi_1, \eta, k_3, \xi_3$. Величины T_1, σ_{in} определяются через параметры воздухозаборника N, Θ_N , используется методика расчетов, аналогичная изложенной в работе [8], с последующим усреднением параметров в выходном сечении воздухозаборника. Определим диапазон изменения параметров подсистем МПХД, для которого использование МГД систем позволяет увеличить удельный импульс двигательной установки. Используем очевидное функциональное соотношение

$$\left. \frac{\partial I_{sp}}{\partial \eta} \right|_{\eta \rightarrow 0} > 0.$$

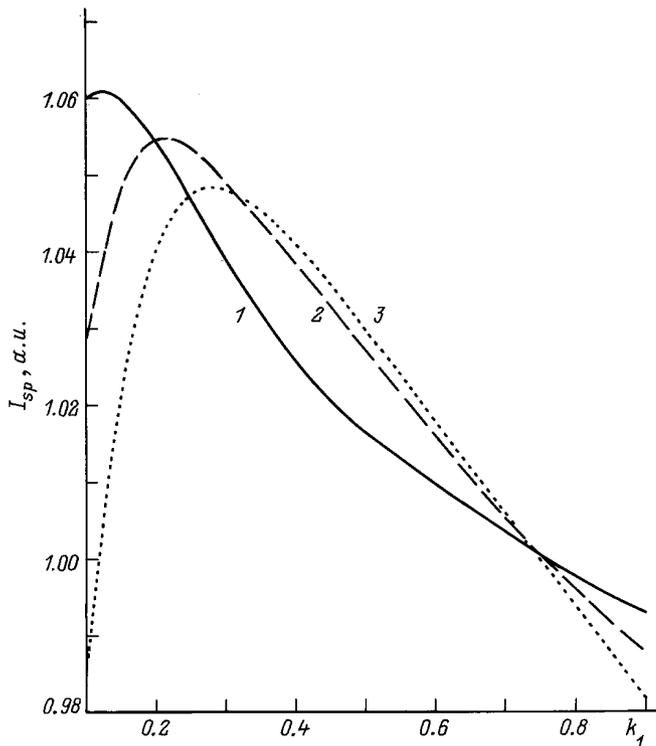


Рис. 3. Зависимость удельного импульса МПХД от коэффициента нагрузки МГД генератора, при значении параметров: $M_0 = 6$, $\Theta_N = 0.2 \text{ rad}$, $k_3 = 2$; $\eta = 0.05$ (1), 0.1 (2), 0.15 (3).

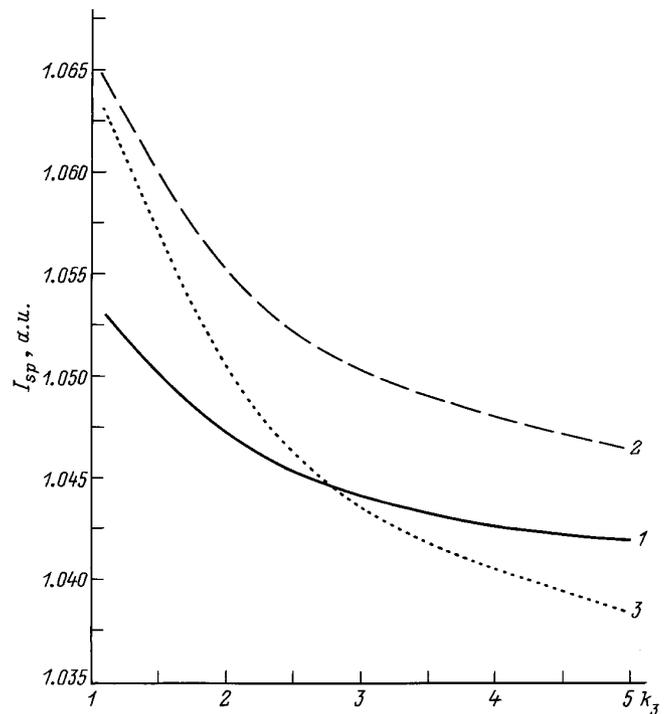


Рис. 4. Зависимость удельного импульса МПХД от коэффициента k_3 : $M_0 = 6$, $\Theta_N = 0.2 \text{ rad}$, $k_1 = 0.25$, $\alpha = 1$, $\eta = 0.05$ (1), 0.1 (2), 0.15 (3).

Из формул (9)–(10) следует, что это условие эквивалентно условию

$$\left. \frac{\partial T_5}{\partial \eta} \right|_{\eta \rightarrow 0} < 0.$$

Прделав необходимые преобразования, получим следующее неравенство:

$$\xi_1 > \frac{T_1}{\Delta T} \frac{1 - k_1/k_3}{1 - k_1}. \quad (11)$$

Так как коэффициент нагрузки для МГД генератора $0 < k_1 < 1$, а для МГД ускорителя соответственно $k_3 > 1$, то увеличение удельного импульса МПХД рассматриваемой конфигурации происходит при положительных значениях ξ_1 , что, согласно (1), отвечает МГД генератору, работающему в режиме с повышением давления по длине канала. Требования к величине градиента давления падают с увеличением ΔT и с уменьшением T_1 . На рис. 2 приведены зависимости удельного импульса МПХД от коэффициента преобразования энтальпии потока в электроэнергию для различных значений числа Маха набегающего потока для идеального и неидеального сопла. Значение $\eta = 0$ соответствует ГПВРД. Все результаты приводятся нормированными на удельный импульс ГПВРД (зависимости на рис. 2–5 при $\xi_1 = \xi_3 = \alpha = 1$ и $N = 2$).

Во всех рассмотренных вариантах МГД преобразование энергии в тракте двигательной установки приводит

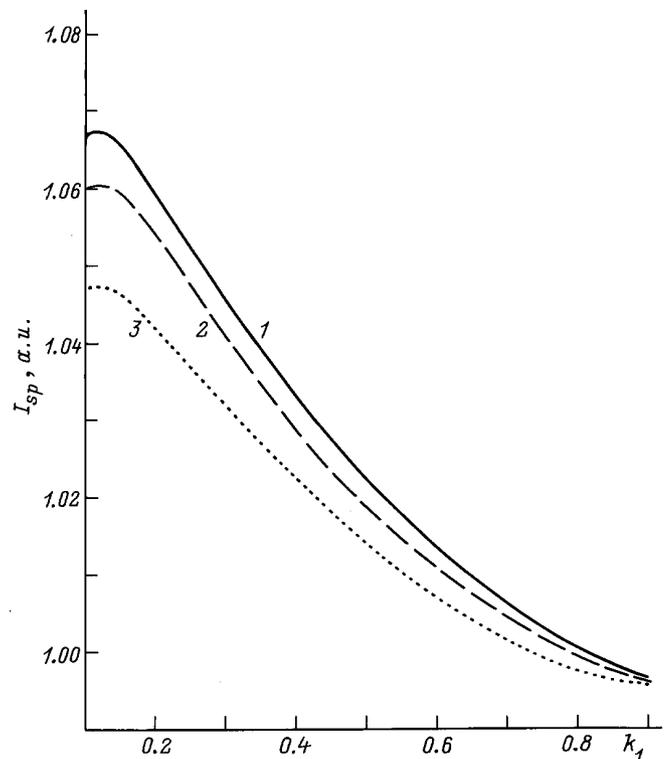


Рис. 5. То же, что на рис. 3, при $M_0 = 6$, $k_3 = 2$, $\eta = 0.05$; $\Theta_N = 0.1$ (1), 0.2 (2), 0.3 rad (3).

к увеличению удельного импульса, причем для неидеального сопла положительный эффект более значим. Относительное увеличение удельного импульса МПХД в рассмотренном варианте более значимо для меньшего значения числа Маха.

Зависимость удельного импульса от коэффициента нагрузки МГД генератора, представленная на рис. 3, носит немонотонный характер с явно выраженным экстремумом. Величина и положение экстремума зависят от коэффициента преобразования энтальпии потока в электроэнергию. С увеличением η положение экстремума смещается в сторону больших значений k_1 , а величина экстремума уменьшается. Из рис. 4 следует, что удельный импульс МПХД монотонно уменьшается с ростом k_3 . С увеличением η зависимость удельного импульса от коэффициента нагрузки k_3 становится более резкой. Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что относительное увеличение удельного импульса максимально для МПХД с воздухозаборником, характеризующимся минимальным значением угла разворота потока.

Результаты расчетов показывают, что использование МГД систем в тракте ГПВРД при надлежащем выборе параметров позволяет увеличить удельный импульс двигательной установки. Получены ограничения на диапазон изменения параметров подсистем МПХД, обеспечивающих повышение удельного импульса двигательной установки. В последующих публикациях будут рассмотрены возможности использования МГД взаимодействия для управления структурой потока и исследованы характеристики МПХД в двумерном эйлеровском приближении.

Список литературы

- [1] *Bityurin V.A., Linebery J.T.* et al. Assessment of Hypersonic MHD concepts. AIAA 97-2393.
- [2] *Курзинер Р.И.* Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
- [3] *Gurijanov E.P., Harsha P.T.* AJAX: New Directions in Hypersonic technology. AIAA paper 96-4609.
- [4] *Andrews E.H., Trexler C.A., Emami S.* Tests of a Fixed- / Geometry Inlet-Combustor Configuration for a Hydrocarbon-Fueled Dual-Mode Scramjet. AIAA 94-2817.
- [5] *Шейкин Е.Г.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 12. С. 1–8.
- [6] *Шейкин Е.Г.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 9. С. 6–15.
- [7] *Curran E.T., Leingang J., Carreiro L., Peters D.* Further Studies of Kinetic Energy Methods in High Speed Ramjet Cycle Analysis. AIAA 92-3805.
- [8] *Берлянд А.Г., Пензин В.И.* Препринт ЦАГИ. М., 1990. № 11. 20 с.