

# Исследование теплообмена в тракте ГПВРД с МГД-управлением течением

Е.Н. Васильев<sup>1)</sup>, В.А. Деревянко<sup>1)</sup>, А.Ф. Латыпов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2)</sup>Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск, Россия

## АННОТАЦИЯ

Представлены результаты численного моделирования в тракте гиперзвукового прямого воздушного реактивного двигателя (ГПВРД) с МГД-управлением структурой газового потока. Расчет структуры и энергетических характеристик течения в канале переменного течения проводился с учетом Джоулева тепловыделения и радиационных потерь энергии в области Т-слоя и теплоты сгорания топлива в области ударно-сжатого газа. Установлено существенное влияние на энергобаланс и энергетические характеристики взаимодействия Т-слоев посредством ударно-волновых возмущений.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ведущих странах мира активно ведутся работы по созданию гиперзвукового самолета. Одним из важнейших направлений исследований является разработка высокоэффективного гиперзвукового воздушно-реактивного двигателя. Эффективность работы ГПВРД со сверхзвуковой скоростью потока в камере сгорания уменьшается с увеличением скорости полета. Причем, основные потери происходят в камере сгорания, так как, во-первых, при подводе тепла в сверхзвуковой поток существенно увеличиваются относительные потери работоспособности газа, во-вторых, из-за больших скоростей потока качество смешения газообразного топлива с воздухом на ограниченной длине существенно ухудшается и, следовательно, падает полнота сгорания. Расчетные оценки показывают, что применение ГПВРД по этой причине ограничено, по видимому, числами Маха полета, не превышающими 11-12. В то же время термодинамические расчеты показывают, что имеется существенный запас по удельным характеристикам. Этот запас частично может быть реализован посредством перестройки структуры потока с использованием МГД-взаимодействия.

В некоторых работах [1] уже рассматривалась и анализировалась возможность применения МГД-генератора на борту самолета, но только как источника электрической энергии. На наш взгляд использование МГД-генератора в таком качестве является нецелесообразным, т.к. полученная энергия отбирается у двигателя, что, несомненно, ухудшит его тяговые характеристики. Причем рассматривается применение МГД-генераторов традиционного типа с присадкой щелочного металла. А это, прежде всего, связано с тем, что для создания проводимости в по-

токе необходимы высокая температура газа (более 2500 К) и наличие присадки щелочного металла. Требуемая масса присадки сравнима с массой топлива и окислителя, что приводит к соответствующему увеличению взлетной массы. Кроме того возникают проблемы однородного внесения присадки в газовый поток и загрязнения окружающей среды.

Авторами данного доклада в [2] было предложено использование МГД-управления газовым потоком в тракте ГПВРД, основанного на создании в потоке локальных плазменных областей (Т-слоев) с температурой  $\sim 10^4$  К, взаимодействующих с внешним магнитным полем, с целью повышения удельных характеристик двигателя. Использование эффекта Т-слоя в ГПВРД позволяет попутно получать электрическую энергию на борту самолета, часть которой идет на инициирование последующих Т-слоев, другая потребляется как полезная энергия. Как источник электрической энергии МГД-генератор с Т-слоем также имеет преимущества перед традиционными МГД-генераторами. Ионизация газа в Т-слое обеспечивается высокой температурой, поэтому нет ограничений на температуру входящего потока и не нужна присадка щелочного металла. В работе [3] были исследованы энергетические характеристики и структура течения в тракте ГПВРД с единичным Т-слоем.

Целью данной работы является численное исследование теплообмена и структуры нестационарного газодинамического течения в тракте ГПВРД с МГД-управлением при периодическом режиме работы.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

### 2.1. Физическое описание процесса

Рассмотрим физические процессы, протекающие в тракте ГПВРД с интегрированным в него МГД-генератором с Т-слоем (Рис. 1.). Набегающий воздушный поток тормозится и сжимается в воздухозаборнике, поступая затем на вход камеры сгорания, конструктивно совмещенной с МГД-каналом. Здесь система инициирования путем высоковольтного пробыга газа периодически создает высокотемпературные токовые слои. Режим МГД-взаимодействия выбирается таким, чтобы Джоулева диссипация компенсировала потери энергии, при этом устанавливается режим самоподдержания электропроводящего плазменного состояния локальной зоны потока, в то же время необходимо, чтобы во внешней цепи накопи-

лась энергия, достаточная для инициирования последующего Т-слоя. Самоподдерживающийся Т-слой в потоке газа является своеобразным плазменным поршнем, к которому приложена тормозящая электромагнитная сила, перестраивающая структуру течения в камере сгорания ГПВРД.

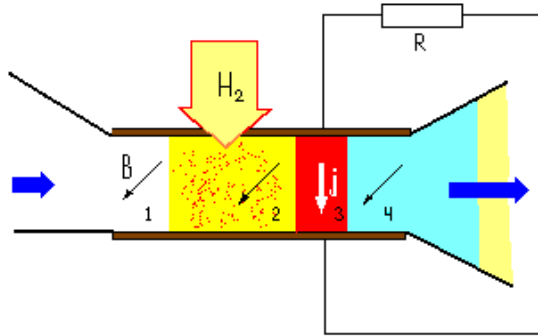


Рис.1. Принципиальная схема ГПВРД с МГД-управлением потоком и структурой течения.

При торможении Т-слоя в тракте ГПВРД формируется нестационарная структура течения, состоящая из следующих зон: 1 - невозмущенное течение газа, 2 - ударно-сжатый газ, 3 - токовый слой, 4 - область волны разрежения (Рис. 1.). С помощью изменения характеристик МГД-взаимодействия (коэффициент нагрузки  $K$ , величина индукции магнитного поля  $B$ ) можно управлять величиной приложенной к Т-слою электромагнитной силы, протяженностью зон и значениями физических параметров в них. Сжигание топлива предлагается производить в области ударно-сжатого газа, здесь выше давление, а скорость потока существенно ниже входной, что способствует более эффективному сжиганию топлива. Кроме того, сжигание топлива в зоне ударно-сжатого газа выгодно с точки зрения термодинамики, т.к. при этом повышается средняя температура подвода тепла при неизменной средней температуре потока. В сопловой части газовой поток ускоряется, создавая тяговый импульс. Основными факторами, влияющими на теплообмен в тракте ГПВРД с МГД-управлением, являются распространяющиеся ударно-волновые возмущения, тепловыделение при сгорании топлива, Джоулева диссипация, радиационный теплоперенос, выделение теплоты при иницировании Т-слоя.

## 2.2. Математическая формулировка задачи

Для описания процессов, протекающих в тракте ГПВРД, использовалась система нестационарных уравнений газовой динамики в эйлеровых координатах

$$\frac{\partial \rho F}{\partial t} + \frac{\partial \rho u F}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u F}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2 F}{\partial x} + \frac{\partial p F}{\partial x} = j B F + p \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho F (e + \frac{u^2}{2})}{\partial t} + \frac{\partial \rho u F (e + \frac{u^2}{2})}{\partial x} + \frac{\partial \rho u F}{\partial x} = (j E + q_{in} + q_f - q_R) F, \quad (3)$$

$$j = \sigma E, \quad E = (1 - K) u B, \quad (4)$$

$$p = R \rho T, \quad E = c_v T. \quad (5)$$

Здесь  $\rho$  - плотность газа,  $F(x)$  - сечение канала,  $u$  - скорость,  $t$  - время,  $x$  - координата,  $p$  - давление,  $j$  - плотность тока,  $e$  - внутренняя энергия,  $E$  - напряженность электрического поля,  $q_{in}$  - мощность тепловыделения при иницировании,  $q_f$  - удельная теплота сгорания топлива,  $q_R$  - радиационные потери энергии,  $\sigma$  - электропроводность,  $T$  - температура.

Граничным условием на входе являются параметры, соответствующие параметрам на выходе из воздухозаборника, которые были рассчитаны предварительно с учетом необратимых потерь энергии на косых скачках, граничное условие на выходе соответствует свободному вылету, т.е. задается равенство нулю производных параметров. Начальным условием является сверхзвуковое невозмущенное течение газа,

Величина радиационных потерь энергии определялась в приближении объемного излучателя в виде  $q_R = 2 \sigma_R \epsilon (T, p, \delta) T^4 / \delta$ . Здесь  $\sigma_R$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $\epsilon$  - коэффициент черноты плоского излучающего слоя,  $\delta$  - толщина излучающего слоя. Теплофизические и радиационные свойства рабочего газа (продуктов сгорания водорода в воздухе) рассчитывались с помощью пакета прикладных программ MONSTR [4] и вводились в программу в виде таблиц  $\sigma(T, p)$ ,  $\epsilon(T, p, \delta)$ ,  $\mu(T, p)$ ,  $\gamma(T, p)$ .

Система уравнений (1)-(5) решалась явным методом Мак-Кормака [5]. В связи с тем, что течение содержит области с большими градиентами параметров (Т-слои, ударные волны) для устранения осцилляций и увеличения точности расчетов использовался метод коррекции потоков FCT [6].

## 2.3. Обсуждение результатов

В данной работе представлены результаты моделирования течения со следующими параметрами сверхзвукового потока на входе в камеру сгорания:  $T=600\text{K}$ ,  $p=4.5 \cdot 10^4 \text{Па}$ ,  $u=1500 \text{м/с}$ . Параметры МГД-взаимодействия:  $K=0.8$ ,  $B=2\text{Т}$ . В ходе численного моделирования был исследован периодический режим работы, когда на входе в камеру сгорания иницируются Т-слои с частотой 500 Гц.

Нестационарный процесс начинается в начальный момент времени иницированием первого Т-слоя, которое моделируется заданием  $q_{in}$  в виде синусоидального импульса длительностью  $10^{-4} \text{с}$  на входе в канал. Мощность тепловыделения задается такой, чтобы за это время температура в локальной области потока поднималась до значения  $\approx 10^4 \text{K}$ , что сопровождается соответствующим повышением давления.

В это же время электропроводящий газ начинает взаимодействовать с магнитным полем, при этом вверх по потоку отходит ударная волна, вниз - волна разрежения (Рис. 2.). За счет индуцированного электрического поля в газе начинает течь ток, компенсирующий радиационные потери энергии и обеспечивающий режим самоподдерживания Т-слоя.

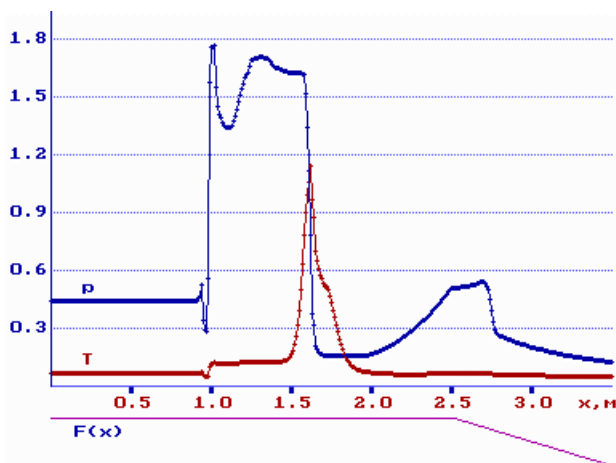


Рис.2. Распределение температуры (масштаб  $10^4\text{K}$ ) и давления ( $10^5\text{Па}$ ) в тракте в момент времени  $t=10^{-3}\text{с}$ .

За фронтом ударной волны заданием величины  $q_f=3.5 \cdot 10^6\text{Дж}$  (на 1кг воздуха) моделируется выделение теплоты при сгорании топлива. Выделение теплоты повышает температуру газа в области ударно-сжатого газа до 1150K (при  $q_f=0$  температура здесь около 830K), увеличивает протяженность этой зоны примерно на 50% и в незначительной степени приводит к увеличению давления и скорости движения Т-слоя. К моменту времени  $10^{-3}\text{с}$  Т-слой формирует стабилизированную структуру, т.е. его параметры остаются в дальнейшем неизменными до выхода в сопловую часть. При входе Т-слоя в сопло температура газа в нем падает (Рис. 3.), но при этом происходит ускорение этой массы газа. Применение эффекта Т-слоя в ГПВРД имеет положительную сторону по сравнению с чисто генераторным процессом, т.к. в данном случае энергия, затраченная на иницирование, не теряется, а вносит заметный вклад в тяговый импульс двигателя.

В момент входа Т-слоя в сопловую часть происходит иницирование последующего Т-слоя (рис. 3.). При этом в камере сгорания еще остается ударно-волновое возмущение, которое движется вверх по потоку и при определенных параметрах МГД-взаимодействия фронт этой ударной волны может достигать вновь иницированного Т-слоя в пределах камеры сгорания, меняя коренным образом его энергетический баланс. В этом случае радиационные потери энергии с повышением давления возрастают прямо пропорционально, а скорость газа и, соответственно, Джоулево тепловыделение уменьшаются, что в итоге приводит к быстрой потере электропроводности, прекращению МГД-взаимодействия и нарушению режима работы двигателя. Данный эффект

является особенностью периодического режима и его необходимо учитывать.

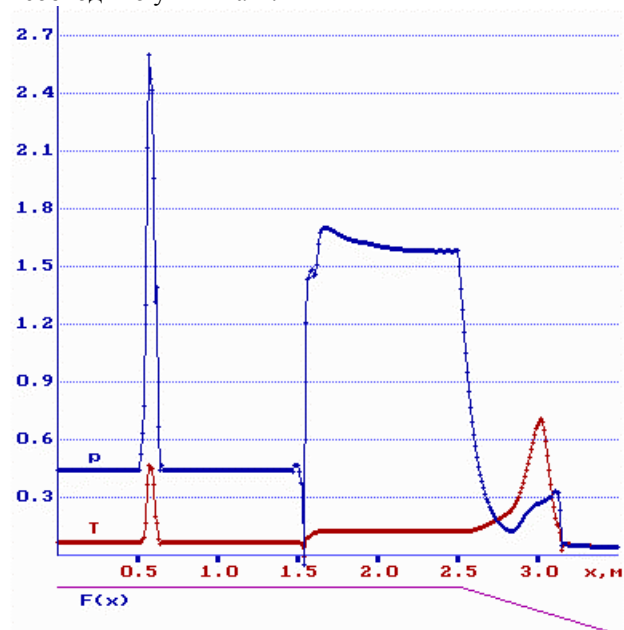


Рис.3. Распределение температуры (масштаб  $10^4\text{K}$ ) и давления ( $10^5\text{Па}$ ) в тракте в момент времени  $t=2.05 \cdot 10^{-3}\text{с}$ .

Для устранения распада Т-слоя необходимо подбирать параметры МГД-процесса, исключая взаимодействие Т-слоя с ударной волной. Это условие накладывает дополнительные ограничения по сравнению с рассмотрением процесса с единичным Т-слоем [3].

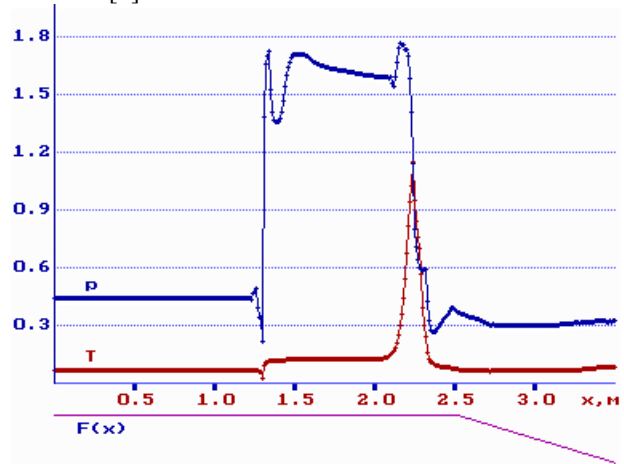


Рис.4. Распределение температуры (масштаб  $10^4\text{K}$ ) и давления ( $10^5\text{Па}$ ) в тракте в момент времени  $t=3.8 \cdot 10^{-3}\text{с}$ .

В рассмотренном периодическом режиме происходит взаимодействие ударной волны с волной разрежения, отходящей от нового Т-слоя, но не происходит взаимодействия Т-слоя с ударной волной, т.к. она успевает выноситься из камеры сгорания (Рис.4.).

При увеличении коэффициента нагрузки до 0.7 и неизменных остальных параметров процесса взаимодействие Т-слоя с ударной волной происходит уже в пределах камеры сгорания в момент времени

$t=3.2 \cdot 10^{-3}$  с, в дальнейшем температура, электропроводность газа и перепад давления на Т-слое уменьшаются, и МГД-взаимодействие практически прекращается (Рис. 5).

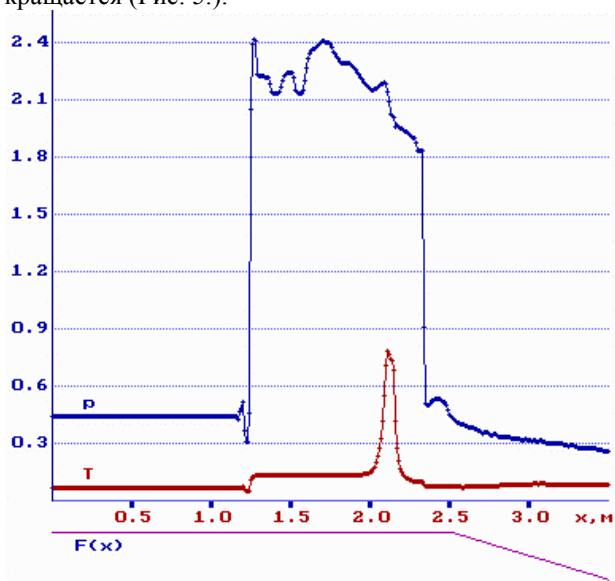


Рис.5. Распределение температуры (масштаб  $10^4$ К) и давления ( $10^5$ Па) в тракте в момент времени  $t=3.8 \cdot 10^{-3}$  с при  $K=0.7$ .

Одной из важнейших характеристик МГД-процесса является эффективность преобразования энтальпии  $\eta_N$ , которая определяется как отношение полезной мощности, выделяемой в нагрузку, к тепловой мощности потока, вносимой через входное сечение камеры сгорания. Для рассматриваемого режима величина  $\eta_N=17\%$  (при  $q_f=0$   $\eta_N=15\%$ ). Если учесть в определении  $\eta_N$ , что в камере сгорания теплосодержание потока увеличивается за счет теплоты сгорания топлива, то в этом случае значение  $\eta_N=7.5\%$ . Важнейшим требованием для организации периодического режима является воспроизводство достаточного количества электрической энергии для инициирования Т-слоев. В данном случае для инициирования одного Т-слоя затрачивалось  $1.6 \cdot 10^5$  Дж на единицу поперечного сечения канала, за пролетное время одним Т-слоем производится полезной энергии  $2.4 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>. При этом следует отметить, что параметры МГД-взаимодействия не были оптимизированы по производству полезной энергии.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование теплообмена и структуры течения в тракте ГПВРД позволили выявить особенности периодического режима работы и показали принципиальную возможность организации МГД-управления газовым потоком с помощью Т-слоя.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГПВРД - гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель;

$\rho, p, T, u$  - плотность, давление, температура и скорость газа, соответственно;  
 $F$  - сечение канала;  
 $t$  - время;  
 $x$  - координата;  
 $j$  - плотность тока;  
 $B$  - индукция внешнего магнитного поля;  
 $e$  - внутренняя энергия;  
 $E$  - напряженность электрического поля;  
 $K$  - коэффициент нагрузки;  
 $c_V$  - теплоемкость при постоянном объеме;  
 $R$  - газовая постоянная;  
 $q_m$  - мощность тепловыделения при иницировании;  
 $q_f$  - удельная теплота сгорания топлива;  
 $q_R$  - объемная мощность радиационных потерь энергии;  
 $\mu$  - молекулярный вес;  
 $\gamma$  - показатель адиабаты;  
 $\sigma_R$  - постоянная Стефана-Больцмана;  
 $\epsilon$  - коэффициент черноты плоского слоя;  
 $\delta$  - толщина плоского излучающего слоя;  
 $\eta_N$  - эффективность преобразования энтальпии;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feasibility Analysis of Aircraft MHD/ J.K. Wideman, J.F. Kunze, J.B. Miles et al.// In: 26th Symp. Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics .- Nashville, Tennessee, USA, 1988. - P. 8.2.1.-8.2.9.
2. Прямоточный воздушно-реактивный двигатель и способ его работы/ А.Ф. Латыпов, В.А. Деревянко, Е.Н. Васильев, В.В. Овчинников// Патент РФ №1803595 от 03.01.1996.
3. Vasilyev E.N., Derevyanko V.A., Latypov A.F. Mathematical simulation of gas flow in hypersonic ramjet with MHD control// In: 7th Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. - Novosibirsk, 1994. - v.2 - P.229-235.
4. Суржиков С.Т. Автоматизированная система исследования радиационных и динамических процессов в низкотемпературной плазме// Препринт №313 ИПМ АН СССР, Москва, 1988. 40 с.
5. MacCormak R.W. The Effect of Viscosity in Hypervelocity Impact Cratering// AIAA Paper 69-354, Cincinnati, Ohio.
6. Book D.L., Boris J.P., Hain K. Flux-Corrected Transport II. Generalization of the Method // Journ. of Comput. Phys. - 1975. - 18. - P. 248 - 283.