

# Study of Heat Transfer in Subsonic Jets of Dissociated Air in HF Plasmatron VGU-4

S. A. Vasil'evskii, S. S. Galkin\*, A. F. Kolesnikov, I. V. Lukomskii,  
E. S. Tepteeva, A. V. Chaplygin

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, 119526, Russia*

\*galkin@ipmnet.ru

## Abstract

This paper presents the results of measurements of heat flux to a cold copper (high catalytic) surface and dynamic pressures in subsonic jets of dissociated air in a wide range of parameters. The experiments were carried out on a 100-kilowatt VGU-4 high-frequency plasmatron. Using the measured values of heat flux to a cold copper calorimeter and dynamic pressures as input data, the enthalpy values at the outer edge of the boundary layer  $h_e$  and the characteristic flow velocity  $V_c$  were determined on the jet axis using the Alpha, Beta and Gamma computer programs. The results obtained can be used to solve problems related to direct local modeling of the aerodynamic heating of re-entry vehicles.

Keywords: induction HF plasmatron, heat flux, probe measurements, subsonic jet, dissociated air, numerical modeling.



Flow around the blunt face model (probe) with rounded edge in the subsonic jet of dissociated air in the test chamber of VGU-4 HF induction plasmatron

УДК 533.6.011.8

# Исследование теплообмена в дозвуковых струях диссоциированного воздуха ВЧ-плазмотрона ВГУ-4

С. А. Васильевский, С. С. Галкин\*, А. Ф. Колесников, И. В. Лукомский,  
Е. С. Тептеева, А. В. Чаплыгин

*ФГБУН Институт Проблем Механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,  
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1*

\*[galkin@ipmnet.ru](mailto:galkin@ipmnet.ru)

## Аннотация

Приведены результаты измерений тепловых потоков к холодной медной (высококatalитической) поверхности и скоростных напоров в дозвуковых струях диссоциированного воздуха в широком диапазоне параметров. Эксперименты проведены на 100-киловаттном ВЧ-плазмотроне ВГУ-4. С использованием измеренных значений тепловых потоков к холодному медному калориметру и динамических давлений как входных данных, с помощью компьютерных программ Alpha, Beta и Gamma на оси струи определены значения энтальпии на внешней границе пограничного слоя  $h_e$  и характерной скорости потока  $V_c$ . Полученные результаты могут использоваться для решения задач, связанных с прямым локальным моделированием аэродинамического нагрева поверхности возвращаемого аппарата.

Ключевые слова: индукционный ВЧ-плазмотрон, тепловой поток, зондовые измерения, дозвуковая струя, диссоциированный воздух, численное моделирование.

## 1. Введение

Моделирование аэродинамического нагрева возвращаемого аппарата в лабораторном эксперименте является важной научно-технической проблемой, поскольку позволяет получить данные о поведении теплозащитного материала в условиях входа в атмосферу. Решение этой задачи требует, в том числе, проведения диагностики высокоэнтальпийных потоков воздуха в лабораторных установках. Массив экспериментальных данных по тепловым потокам к эталонной высококatalитической поверхности и скоростным напорам – это минимум, необходимый для определения энтальпии на внешней границе пограничного слоя около модели и установления области параметров «энтальпия – давление торможения», в которой можно ставить задачу локального моделирования аэродинамического нагрева в точке торможения потока на поверхности затупленного тела с применением ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 (уникальная научная установка РФ, <https://ipmnet.ru/uniquequip/plasma/>, <http://www.ckr-rf.ru//usu/441568>).

Важным направлением работы Лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с материалами ИПМех РАН являются испытания образцов материалов на термохимическую стойкость в струях диссоциированных газов. При этом всегда актуальным остается вопрос об адекватности условий испытаний образцов материалов в ВЧ-плазмотроне условиям аэродинамического нагрева поверхности тела, входящего в атмосферу с большой скоростью. В лабораторных условиях не удастся полностью осуществить моделирование такого нагрева, но возможно локальное моделирование условий теплопередачи от пограничного слоя к точке торможения потока на поверхности тела. В частности, в [1] определена область в координатах

натах «полная энтальпия – давление торможения», в которой возможно локальное моделирование теплового потока в дозвуковых высокоэнтальпийных струях воздуха ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 для тела с радиусом затупления 1 м.

Основным и наиболее важным параметром потоков диссоциированных газов при исследовании их термохимического взаимодействия с поверхностью образцов материалов является энтальпия газа на внешней границе пограничного слоя около модели. В ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН), энтальпия струи диссоциированного воздуха определяется режимом работы установки, т.е. комбинацией основных рабочих параметров, таких как подводимая мощность анодного питания ( $N_{ap}$ ), высота модели (зонда) над срезом выходного интерфейса разрядного канала ( $Z$ ), расход газа через разрядный канал, давление в рабочей камере ( $P_{ch}$ ).

Экспериментальные способы непосредственного измерения энтальпии с применением зондовых исследований трудны в реализации и не дают необходимой точности измерений [2]. В Лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с материалами ИПМех РАН разработан и успешно применяется расчетно-экспериментальный метод оценки энтальпии на оси дозвуковой струи на внешней границе пограничного слоя [3]. Суть метода заключается в проведении численного моделирования течения газовых потоков в рабочей камере установки и обтекания модели с последующим восстановлением энтальпии по измеренным тепловым потокам к охлаждаемой высококаталитичной поверхности модели ( $q_w$ ) и динамическим давлениям ( $P_{dyn}$ ) на оси струи. Цель работы заключалась в получении совокупности данных о теплосодержании и динамическом давлении высокоэнтальпийной воздушной струи при обтекании цилиндрической водоохлаждаемой модели радиусом 25 мм со скругленными кромками (рис. 1) в зависимости от давления в барокамере  $P_{ch}$ , величины анодного питания ВЧ-генератора ( $N_{ap}$ ), и высоты модели над срезом выходного интерфейса разрядного канала  $Z$ , меняющихся в широких пределах. Значения давления в барокамере в представленных экспериментах составили 60 и 80 гПа, что соответствовало предельным значениям на участке траектории аппарата IXV [4], для которого возможно локальное моделирование теплового потока в окрестности носка радиуса 1 м.



Рис. 1. Обтекание модели в струе плазмотрона ВГУ-4

## 2. Условия экспериментов

Экспериментальные исследования проводились в дозвуковых струях воздушной плазмы на ВЧ-установке ВГУ-4. Основные характеристики установки приведены в табл. 1. Более подробно с устройством установки и ее возможностями можно ознакомиться в [5, 6].

Таблица 1

Характеристики плазмотрона ВГУ-4

Параметр	Значение
Мощность анодного питания, кВт	12 ÷ 76
Частота, МГц	1.76
Диаметр разрядного канала, мм	80
Расход воздуха, г/с	2 ÷ 6
Режим течения потока плазмы	Дозвуковой и сверхзвуковой
Давление в испытательной камере, гПа	6 ÷ 1000

При определении теплосодержания высокоэнтальпийных струй диссоциированных газов основными измеряемыми параметрами является плотность теплового потока к холодной высококаталитической непроницаемой стенке в точке торможения потока  $q_w$  и динамическое давление  $P_{dyn}$ . Измерения проводились с использованием специализированных зондов.

Диапазон значений анодного питания ВЧ-генератора  $N_{ap}$  составлял от 20 до 70 кВт и определялся режимом работы установки ВГУ-4. Величина высоты модели  $Z$  изменялась от 60 до 100 мм (рис. 2). Верхний предел определяется потерей устойчивости струи. Режимы проведения экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы проведения экспериментов на ВГУ-4

Параметр	Значение
Мощность анодного питания, $N_{ap}$	ступенчатое изменение мощности от 20 до 70 кВт с шагом 10 кВт
Плазмообразующий газ	Воздух
Расход плазмообразующего газа	2.4 г/с
Режим истечения	Дозвуковой
Диаметр выходного сечения канала, $D$	80 мм
Расстояние до поверхности модели, $Z$	ступенчатое изменение высоты модели от 60 до 100 мм с шагом 10 мм
Давление в барокамере, $P_{ch}$	60 и 80 гПа

## 3. Измерения тепловых потоков

Для измерения плотности теплового потока к холодной высококаталитической непроницаемой стенке применялся метод проточного калориметра, в котором мерой передаваемого от газовой струи тепла является разность температур протекающей жидкости на входе и выходе калориметра.

Калориметрический датчик (рис. 2, рис. 3, б) представляет собой полый медный цилиндр, внутри которого протекает охлаждающая вода. Рабочий элемент нагревается потоком газа и передает теплоту омывающей его воде. С боковой стороны рабочий элемент защищен водоохлаждаемым медным корпусом модели (поз. 1, рис. 3, б). Для уменьшения перетоков тепла в модель калориметр изолируется от нее теплоизоляционной втулкой, выполненной из фторопласта.



Рис. 2. Схема калориметрического датчика

При заданном расходе воды  $G_w$  и известной площади тепловоспринимающей поверхности  $A$  калориметра величина плотности теплового потока  $q_w$  определяется только разностью температур протекающей охлаждающей воды  $\Delta t$  и ее теплоемкостью  $c_w$ . Если пренебречь утечками тепла с нерабочих поверхностей калориметра, то средний удельный тепловой поток к рабочей поверхности калориметра определяется по формуле

$$q_w = \frac{c_w \cdot G_w \cdot \Delta t}{A} \quad (1)$$

Более подробно с методикой измерений тепловых потоков можно ознакомиться в [7–9].

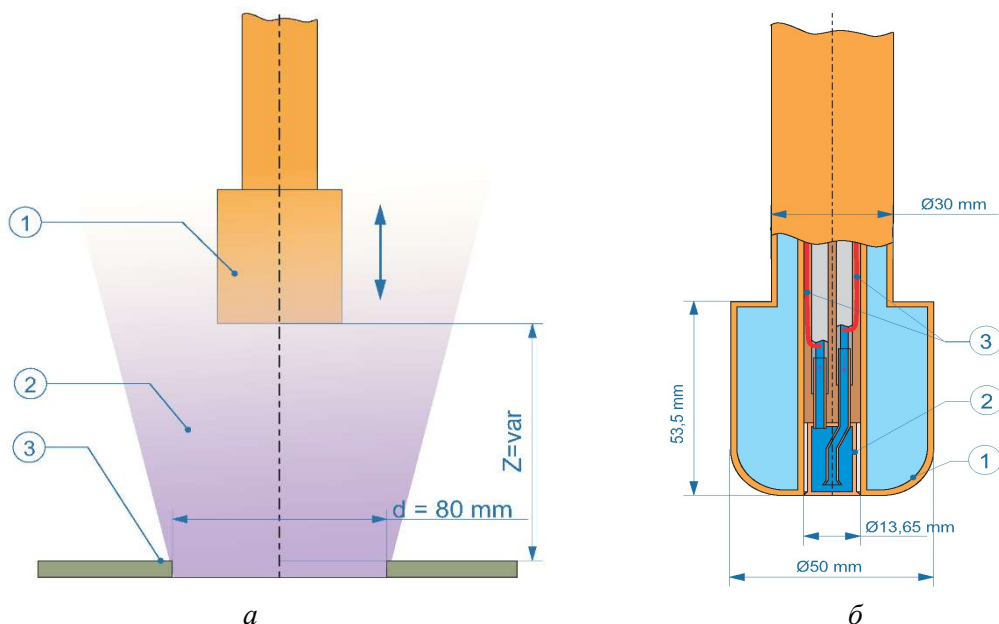


Рис. 3. Схема зонда: а – схема размещения зонда: 1 – зонд; 2 – плазма; 3 – выходной интерфейс; б – конструктивная схема измерительного зонда: 1 – водоохлаждаемая модель; 2 – калориметрический датчик; 3 – терморпарный блок

Измерительный зонд состоит из медного калориметрического датчика (поз. 1, рис. 3, б), установленного в водоохлаждаемой модели (поз. 1, рис. 3, а), форма и размеры которой соответствует форме и размерам маски, используемой для испытания образцов материалов. Измерительный зонд располагается строго по оси исследуемой высокоэнтальпийной струи.

Модель представляет собой двух-стеночный водоохлаждаемый медный корпус 1 цилиндрической формы диаметром 50 мм с плавным скругленным переходом от боковой поверхности к плоскому торцу (рис. 3, б), на оси которого располагается отверстие для установки калориметрического датчика 2. Внутри корпуса проложены трубки для подключения калориметрического датчика к системам подачи и слива охлаждающей жидкости. В непосредственной близости от калориметрического датчика размещен термопарный блок 3, который служит для измерения разности температур протекающей через датчик охлаждающей воды ( $\Delta t$ ). Расход охлаждающей воды  $G_w$ , протекающей через калориметр, контролируется с применением ультразвукового жидкостного расходомера Bronkhorst ES-Flow.

Тепловоспринимающая поверхность и корпус калориметрического датчика выполнены из меди, что обеспечивает однородное температурное поле на поверхности за счет хорошей теплопроводности меди. Следует отметить, что медь является высококаталитическим материалом для высокоэнтальпийной диссоциированной воздушной струи и позволяет оценить наибольший возможный тепловой поток.

Медный датчик выдерживали в потоке воздушной плазмы при мощности  $N_{ap} = 60$  кВт до достижения установившегося значения теплового потока (до окисления тепловоспринимающей поверхности). Затем, варьируя параметрами  $N_{ap}$  от 20 до 70 кВт и  $Z$  от 60 до 100 мм, проводили непосредственные измерения. Все диапазоны значений параметров  $N_{ap}$  и  $Z$  были исследованы за один цикл измерений.

Диаметр тепловоспринимающей поверхности медного калориметрического датчика составляет 13.65 мм, что соответствует площади тепловоспринимающей поверхности  $A = 146.3$  мм<sup>2</sup>. При расчете плотности теплового потока, величины  $\Delta t$ ,  $N_{ap}$  и  $G_w$  усреднялись для каждой расчетной точки за цикл измерений. На рис. 4 приведены измеренные значения плотности теплового потока ( $q_w$ , Вт/см<sup>2</sup>) в зависимости от высоты модели над плоскостью выходного сечения разрядного канала ( $Z$ , мм) при переменной мощности ВЧ-генератора плазмотрона ( $N_{ap}$ , кВт) и давлении в рабочей камере  $P_{ch}$  равным 60 и 80 гПа соответственно. Полученные зависимости плотности теплового потока от высоты модели носят линейный характер. Варьируя подводимой мощностью и высотой модели, можно получать тепловые потоки от 5 до 200 Вт/см<sup>2</sup>.

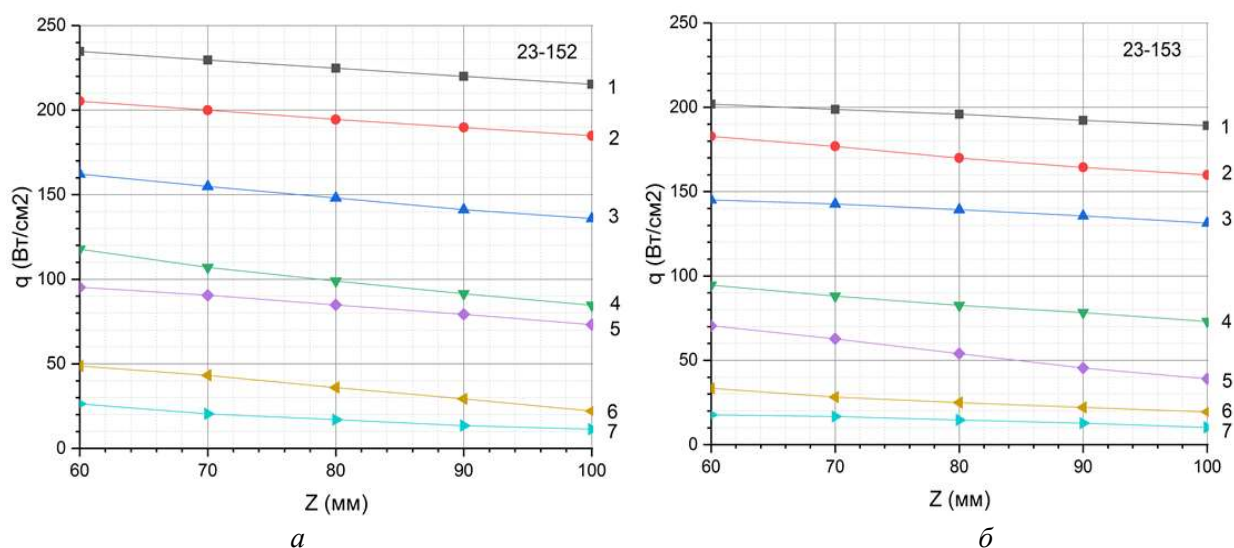


Рис. 4. Зависимость плотности теплового потока  $q_w$  от высоты  $Z$  измерительного зонда и подводимой мощности  $N_{ap}$  при давлении в рабочей камере  $P_{ch}$ : а – 60 гПа; б – 80 гПа; 1 – 70 кВт; 2 – 60 кВт; 3 – 50 кВт; 4 – 40 кВт; 5 – 30 кВт; 6 – 20 кВт; 7 – 16 кВт

Из приведенных графиков видно, что увеличение давления в рабочей камере  $P_{ch}$  60 до 80 гПа приводит к незначительному росту теплового потока  $q_w$  во всем диапазоне мощностей  $N_{ap}$  и высот  $Z$ .

#### 4. Измерения динамических давлений

Скорость потока в какой-либо точке дозвуковой струи плазмы технически сложно измерить непосредственно, однако скорость на оси можно определить по совокупности данных измерений динамического давления, выполненных с использованием трубки Пито в качестве зонда, и результатов численного моделирования обтекания модели дозвуковой струей высокоэнтальпийного воздуха.

Трубка Пито [9] представляет собой двухстеночный водоохлаждаемый медный зонд цилиндрической формы диаметром 16 мм с плавным скругленным переходом от боковой поверхности к плоскому носку, на оси которого располагается приемное отверстие диаметром 3 мм (рис. 5, а).

Давление торможения  $P_0$  можно представить, как сумму статического  $P_{ch}$  и динамического  $P_{dyn}$  давлений:  $P_0 = P_{ch} + P_{dyn}$ . Для измерения динамического давления  $P_{dyn}$  использовался дифференциальный датчик давления (МН, рис. 5, б) типа «Элемер АИР-20ДД/М2». Первый вход датчика соединялся с зондом 1 (место забора – поз. 4) в месте измерения полного давления  $P_0$  струи, второй вход сообщался с объемом рабочей камеры (за границами струи, место забора – поз. 5), обеспечивая измерение статического давления  $P_{ch}$ .

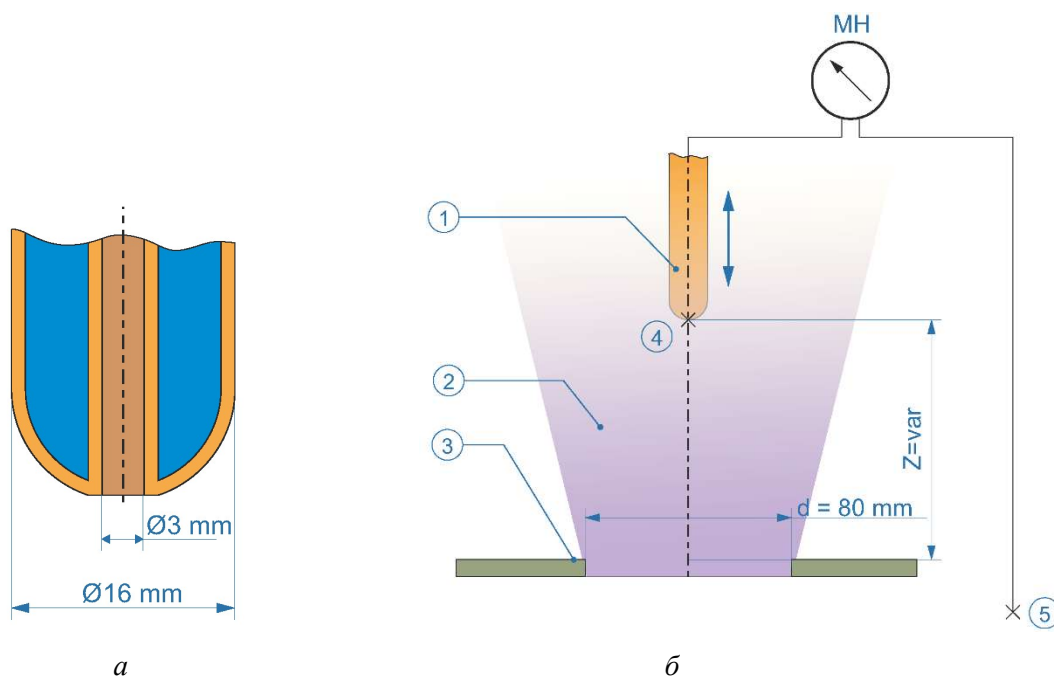


Рис. 5. Схема зонда: а – конструктивная схема измерительного зонда; б – схема размещения зонда: 1 – зонд; 2 – плазма; 3 – выходной интерфейс (сопло); 4 – место забора пробы 1; 5 – место забора пробы 2; МН – дифференциальный манометр

При измерении динамического давления, также как и при калориметрических измерениях, измерительный зонд располагался строго на оси исследуемой струи соосно выходу из разрядного канала. Измерительный зонд – водоохлаждаемая трубка Пито – вводился в струю при мощности анодного питания  $N_{ap} = 70$  кВт. Затем, варьируя параметрами  $N_{ap}$  от 20 до 70 кВт и  $Z$  от 60 до 100 мм, проводили измерения динамического давления  $P_{dyn}$ .

На рис. 6 приведены измеренные значения динамического давления в струе  $P_{dyn}$  в зависимости от высоты зонда над плоскостью выходного сечения сопла ( $Z$ , мм) при переменной мощности ВЧ-генератора плазмотрона ( $N_{ap}$ , кВт). Диапазон измеренных динамических давлений составил от 2.6 до 93.6 Па при статическом давлении 60 гПа и от 1.5 до 67.1 Па при статическом давлении 80 гПа.



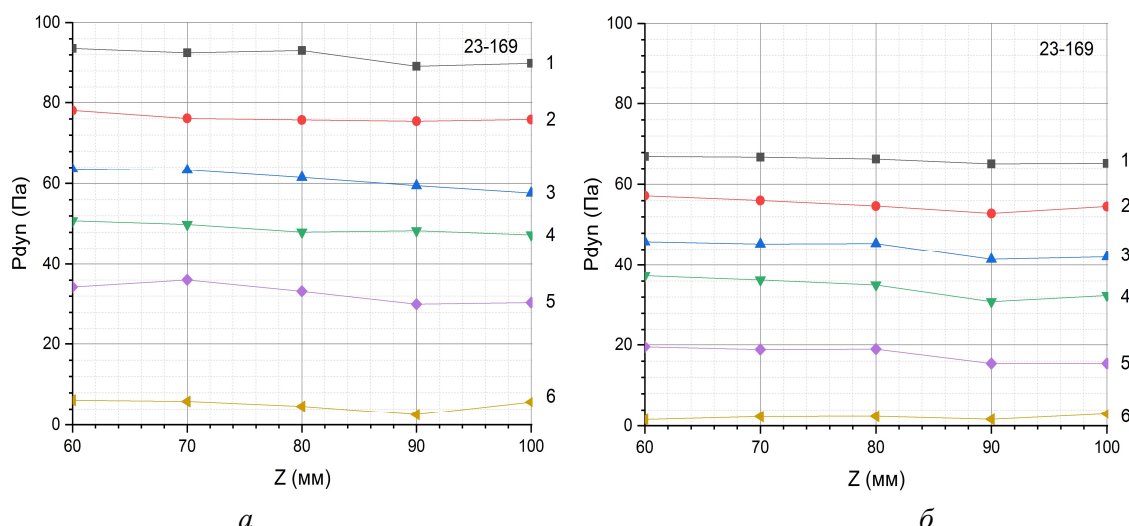


Рис. 6. Зависимость динамического давления  $P_{dyn}$  от высоты  $Z$  измерительного зонда и подводимой мощности  $N_{ap}$  при давлении в рабочей камере  $P_{ch}$ : а – 60 гПа; б – 80 гПа: 1 – 70 кВт; 2 – 60 кВт; 3 – 50 кВт; 4 – 40 кВт; 5 – 30 кВт; 6 – 20 кВт

Полученные зависимости динамического давления  $P_{dyn}$  от высоты модели носят характер, близкий к линейному, и незначительно меняются с высотой, что говорит о дальнобойности и высоком тепловом качестве дозвуковых струй высокоэнтальпийного воздуха в реализованных экспериментах.

Из сравнения полученных зависимостей видно, что величина перепада давления  $P_{dyn}$  сильно зависит от величины статического давления в рабочей камере  $P_{ch}$ , поскольку даже не столь значительное изменение статического давления с 60 до 80 гПа вызывает снижение динамического давления на 30 %.

## 5. Расчеты течения в разрядном канале и обтекания модели в испытательной камере плазмотрона ВГУ-4

Для численного моделирования течений плазмы в разрядном канале 100-киловаттного плазмотрона ВГУ-4, обтекания моделей дозвуковыми струями диссоциированных газов, истекающих из канала, и расчетов плотности тепловых потоков от химически неравновесного пограничного слоя к модели используется комплексный метод [10], основанный на разбиении задачи в целом на три существенно различные области. Первая область – разрядный канал, где равновесное течение плазмы и вихревое электромагнитное поле, порожденное ВЧ током индуктора, рассчитываются с помощью компьютерной программы Alpha на основе уравнений Навье – Стокса и упрощенных уравнений Максвелла. Вторая область – испытательная камера плазмотрона, где установлена исследуемая модель, обтекаемая струей диссоциированного газа из разрядного канала. Обтекание модели дозвуковой равновесной струей газа рассчитывается с помощью программы Beta на основе уравнений Навье – Стокса. Третья область – относительно тонкий химически неравновесный пограничный слой на оси симметрии струи вблизи передней критической точки модели. Расчет течения в пограничном слое и теплового потока к критической точке модели проводится с помощью программы Gamma на основе решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений [10, 11] в рамках модели пограничного слоя конечной толщины для заданного эффективного коэффициента рекомбинации атомов на поверхности модели. В данной работе с помощью комплекса программ Alpha, Beta и Gamma проведены расчеты течений в указанных трех областях для условий описанных выше экспериментов на плазмотроне ВГУ-4 (табл. 2).

На рис. 7 показаны результаты расчета в разрядном канале ВГУ-4 – изолинии безразмерной функции тока  $f$ , отнесенной к значению на стенке канала, и изотермы  $T$ , [K], для



условий эксперимента при давлении на входе в канал  $P = 80$  мбар, мощности по анодному питанию  $N_{ap} = 50$  кВт. Для расчета по программе Alpha в качестве входного параметра задавалась мощность, вкладываемая в плазму:  $N_{pl} = N_{ap} \times E_f = 32.2$  кВт, где  $E_f$  – к.п.д. плазмотрона, который был измерен ранее с помощью специальных экспериментов как функция мощности.

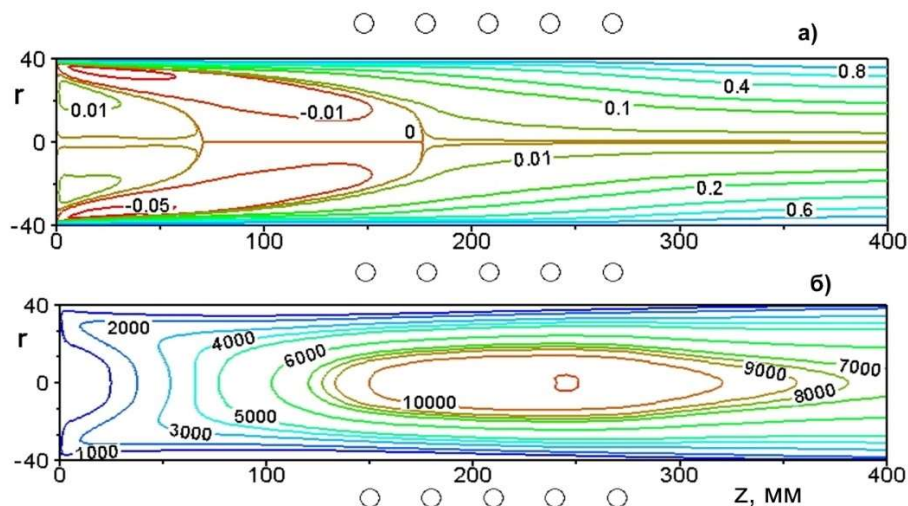


Рис. 7. Изолинии безразмерной функции тока  $f(a)$  и изотермы ( $b$ ) в разрядном канале плазмотрона ВГУ-4 для давления 80 мбар и мощности  $N_{ap} = 50$  кВт

На рис. 8 приведены радиальные профили продольной компоненты скорости и температуры на выходе из разрядного канала для того же режима работы плазмотрона. Радиальные профили параметров потока на выходе из разрядного канала плазмотрона используются как входные данные для программы Beta для расчета обтекания испытываемой модели дозвуковой струей равновесного диссоциированного воздуха в испытательной камере.

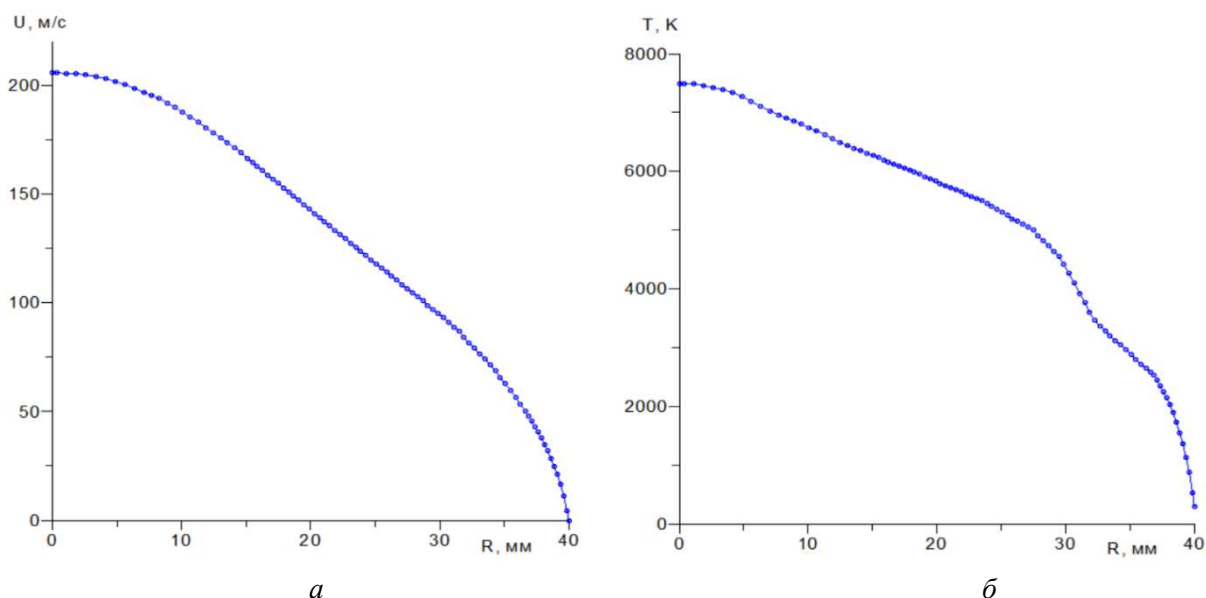


Рис. 8. Радиальные профили скорости ( $a$ ) и температуры ( $b$ ) на выходе из разрядного канала для давления 80 мбар и мощности плазмотрона  $N_{ap} = 50$  кВт

В данной работе расчеты проведены с учетом тангенциальной компоненты скорости, т.е. закрутки потока, с помощью модифицированной программы WBeta. Подробнее о влиянии закрутки потока на течение в испытательной камере ВГУ-4 и программе WBeta можно ознакомиться в [12].

На рис. 9 показаны распределения продольной компоненты скорости  $U$  и энтальпии потока  $h$  как функции расстояния  $Z$  вдоль оси симметрии от выхода из разрядного канала до переднего торца модели с затупленной передней кромкой («ESA standard model»), расположенной на расстоянии  $Z_m = 60$  мм от среза канала, для давления 80 мбар, для ряда значений мощности  $N_{ap}$ .

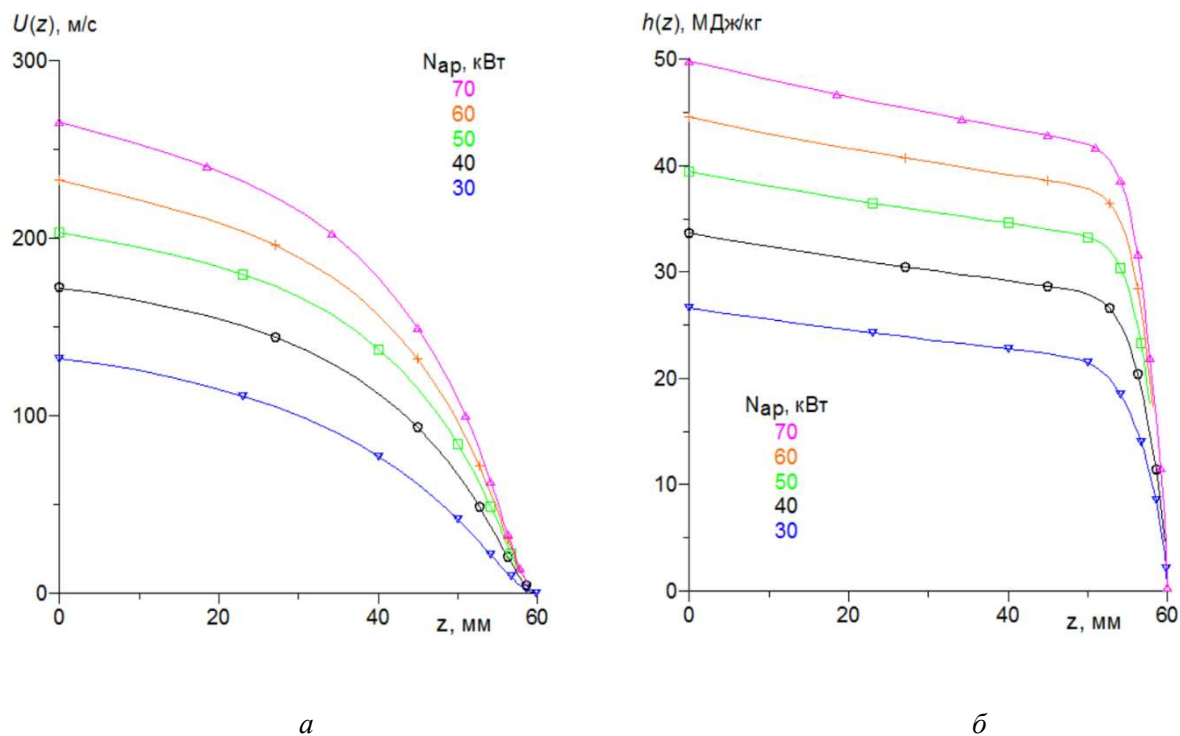


Рис. 9. Скорость  $U$  (а) и энтальпия  $h$  (б) как функции  $z$  для различных значений мощности  $N_{ap}$  для случая обтекания модели с затупленной передней кромкой («ESA standard model»), установленной на расстоянии  $Z_m = 60$  мм от среза канала, для давления 80 мбар

На рис. 10 показаны распределения  $U$  и  $h$  для давлений 80 и 60 мбар, для обтекания модели «ESA standard model» (евромодель, сплошные линии) и модели с плоским торцом (штриховые линии). Видно, что энтальпия  $h(z)$  слабо зависит от геометрии модели и от давления.

Рассчитанные изолинии безразмерной функции тока  $f$  и изотермы  $T$ , [K] в ядре струи, включая относительно тонкий пограничный слой у переднего торца модели, показаны на рис. 11 для случая обтекания модели «ESA standard model» и расстояния от среза канала до модели  $Z_m = 60$  мм при  $P = 80$  мбар,  $N_{ap} = 50$  кВт.

Важный результат расчета по программе Beta (или WBeta) - набор безразмерных параметров, определяющих толщину пограничного слоя перед критической точкой модели и завихренность потока на внешней границе этого слоя. Эти параметры являются необходимыми входными данными для последующего расчета по программе Gamma и вычисляются по следующим формулам:

$$\Delta = \delta/R_m, \quad (2)$$

$$V_{e0} = u(Z_e, r = 0)/U_0, \quad (3)$$

$$\beta_e = u_1(Z_e), \quad (4)$$

$$\Omega = R_m du_1(z)/dz, \quad (5)$$

$$u_1(z) = (R_m/U_0) \partial v(z, r)/\partial r \quad (6)$$

Здесь  $\delta$  – размерная толщина пограничного слоя;  $Z_e$  – продольная координата, соответствующая положению внешней границы пограничного слоя, отмеченной индексом “e”;  $U_0 = u(0,0)$  – скорость потока на срезе канала на оси симметрии;  $R_m$  – радиус модели;  $u_1(z)$  – безразмерный градиент скорости вдоль оси струи, при этом производная  $\partial v(z,r)/\partial r$  в формуле (6) берется в окрестности оси симметрии  $r = 0$ ;  $\beta_e$  – безразмерный градиент скорости;  $\Omega$  – параметр, характеризующий завихренность потока на внешней границе пограничного слоя;  $u$  и  $v$  – продольная и радиальная компоненты скорости.

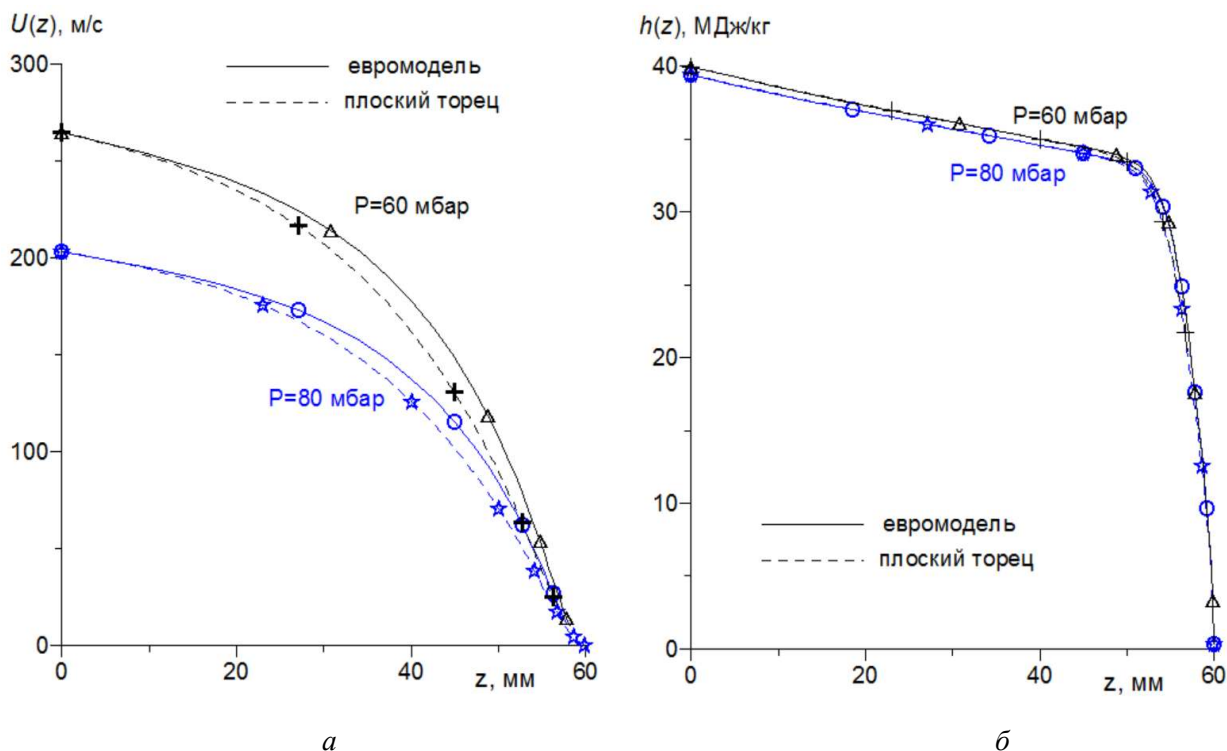


Рис. 10. Скорость  $U(a)$  и энтальпия  $h(b)$  как функции  $z$  для мощности  $N_{ap} = 50$  кВт, для случаев обтекания евромодели «ESA standard model» (сплошные линии) и модели с плоским торцом (штриховые линии),  $Z_m = 60$  мм от среза канала, для давлений 80 и 60 мбар

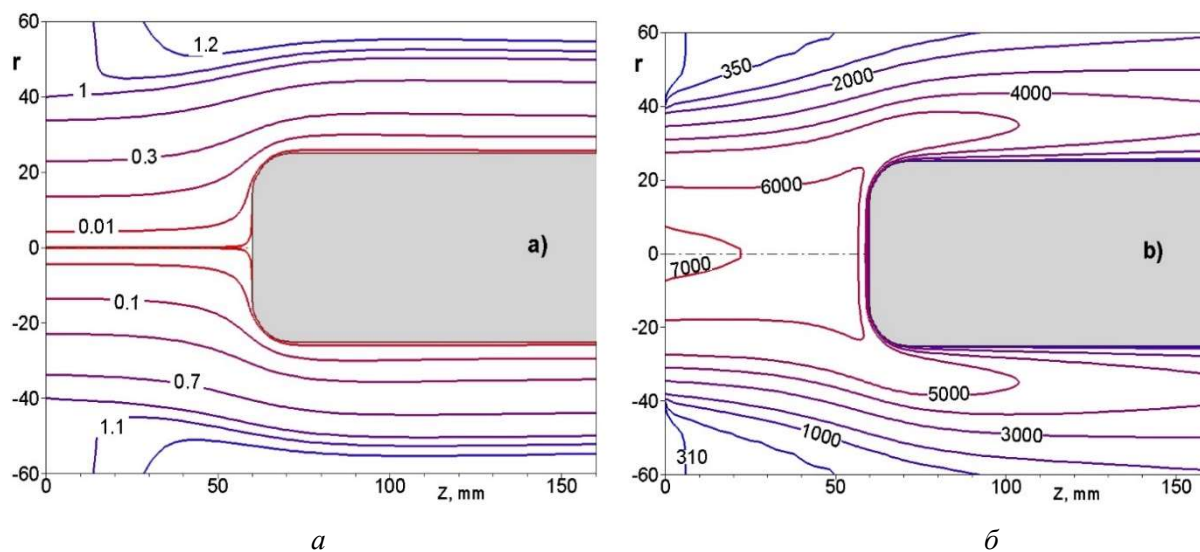


Рис. 11. Изолинии  $f(a)$  и изотермы  $(b)$  в ядре струи, обтекающей модель «ESA standard model» для давления 80 мбар и мощности плазмотрона  $N_{ap} = 50$  кВт

## 6. Расчет энтальпии на внешней границе пограничного слоя на основе экспериментальных данных по тепловым потокам и скоростным напорам

Для определения энтальпии на оси дозвуковой струи диссоциированного газа применяется комбинированный расчетно-экспериментальный метод [3]. В ходе экспериментов определяются значения плотности теплового потока  $q_{wexp}$  к медному водоохлаждаемому калориметру и динамического давления  $P_{dyn}$ , измеренного с помощью водоохлаждаемой трубки Пито (см. раздел 4). Из расчетов по программе WBeta определяются безразмерные параметры (2)–(6), характеризующие толщину пограничного слоя и завихренность потока на внешней границе пограничного слоя на оси струи. Полученные экспериментальные и расчетные данные используются как входные параметры для программы Gamma, реализующей расчет течения и теплообмена в химически неравновесном пограничном слое конечной толщины на оси симметрии в окрестности критической точки модели с учетом рекомбинации атомов на поверхности. Далее энтальпия  $h_e$  на внешней границе пограничного слоя на оси симметрии определяется из условия равенства измеренного теплового потока  $q_{wexp}$  и теплового потока  $q_{wcalc}$ , полученного из расчета по программе Gamma для условий эксперимента, в результате итерационного решения обратной задачи для уравнения  $q_{wexp} = q_{wcalc}(h_e, T_w, \gamma_w)$ . Здесь  $T_w = 300$  К – температура поверхности модели,  $\gamma_w = 1$  – эффективный коэффициент рекомбинации атомов на идеально каталитической поверхности. Отметим, что в ходе расчета по программе Gamma по измеренному значению  $p_{dyn}$  определяется также характерная скорость потока  $V_c$  из уравнения  $P_{dyn} = 0.5 k_p \rho_c V_c^2$ , где  $\rho_c$  – плотность газа,  $k_p = 1.1$  – эмпирический коэффициент.

Определенные с помощью описанного метода значения энтальпии  $h_e$  показаны на рис. 12 для условий экспериментов, описанных в разделе 2:  $N_{ap} = 30 \div 70$  кВт,  $Z_m = 60 \div 80$  мм. Данные получены для водоохлаждаемых цилиндрических моделей диаметром 50 мм, с закругленной передней кромкой (евромодель) и с плоским торцем (FF-модель). Максимальное отличие значений  $h_e$ , рассчитанных для двух разных геометрий моделей, не превышает 10% для рассмотренных диапазонов  $Z_m$  и  $N_{ap}$ .

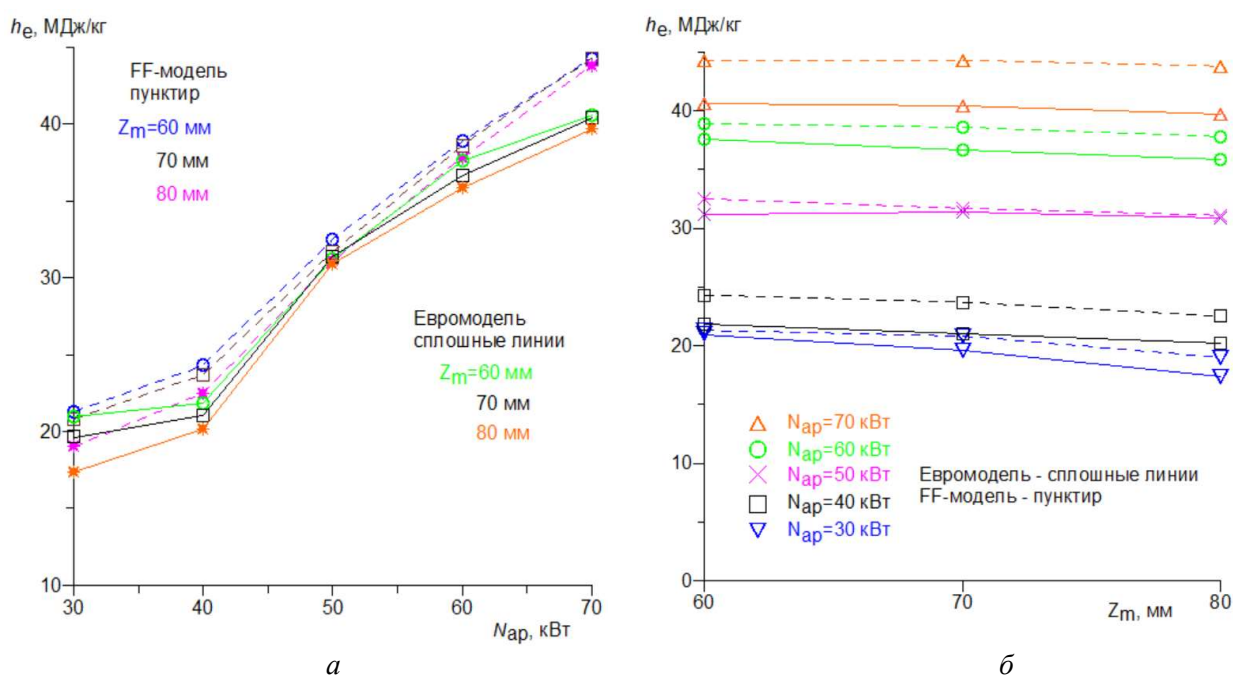


Рис. 12. Энтальпия  $h_e$  как функция мощности  $N_{ap}$  (а) и расстояния до модели  $Z_m$  (б), для евромодели «ESA standard model» (сплошные линии) и для модели с плоским торцем (штриховые линии)

Эти результаты свидетельствуют о дальнобойности и высоком тепловом качестве струй высокоэнтальпийного воздуха в ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 для новых режимов.

## 7. Заключение

Зависимости плотности теплового потока  $q_w$  к холодной высококatalитичной стенке и динамического давления  $P_{dyn}$  от высоты модели, полученные при давлениях в рабочей камере 60 и 80 гПа, носят характер близкий к линейному и незначительно меняются с высотой, что говорит о дальнобойности и высоком тепловом качестве дозвуковых струй высокоэнтальпийного воздуха в реализованных экспериментах на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4. Варьируя подводимой мощностью и высотой модели, можно получать тепловые потоки в широких пределах от 5 до 200 Вт/см<sup>2</sup> и энтальпии дозвуковых струй диссоциированного воздуха в интервале 17.5 ÷ 45 МДж/кг.

Полученные новые данные по энтальпии и скорости дозвуковых струй высокоэнтальпийного воздуха в ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 позволяют расширить область траекторных параметров входа в атмосферу, для которых возможно прямое локальное моделирование аэродинамического нагрева в окрестности лобовой точки затупленных тел.

## Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по теме государственного задания № 124012500440-9 на уникальной научной установке (УНУ) «Высокочастотные индукционные плазмотроны ВГУ-3 и ВГУ-4» (<https://ckp-rf.ru/usu/441568/>).

## Литература

1. Kolesnikov A.F., Shchelokov S.L. Analysis of the simulation conditions of the aerodynamic heating in subsonic high-enthalpy air jets from the VGU-4 HF plasmatron // Fluid Dynamics. 2021. Vol.56, №2. pp. 236–241.
2. Anderson L.A., Sheldahl R.E. Experiments with two flow-swallowing enthalpy probes in high-energy supersonic streams // AIAA Journal. 1971. Vol. 9. No. 9. pp. 1804-1810.
3. Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А., Тептеева Е.С. Влияние геометрии разрядного канала ВЧ-плазмотрона на теплообмен в высокоэнтальпийных дозвуковых струях воздуха // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 4. С. 509–517.
4. Schouler M., Prévèreaud Y., Mieussens L. IXV post-flight reconstruction and analysis of the aerothermodynamic measurements along the rarefied portion of the reentry trajectory // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 178. No. 121582.
5. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Новые режимы течения и теплообмена плазмы в индукционном плазмотроне ВГУ-4 // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т. 7.
6. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Высокочастотные индукционные плазмотроны серии ВГУ // Актуальные проблемы механики: Физико-химическая механика жидкостей и газов. М.: Наука. 2010. С. 151-177.
7. ASTM E422-05(2016). Standard Test Method for Measuring Heat Flux Using a Water-Cooled Calorimeter // ASTM International, West Conshohocken, PA. 2016.
8. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. Под ред. А. В. Лыкова. М., «Энергия». 1976. 392 с.
9. Физика и техника низкотемпературной плазмы / С.В. Дресвин, А.В. Донской, В.М. Гольдфарб, В.С. Клубникин, под общ. ред. С.В. Дресвина. – Москва: Атомиздат. 1972.
10. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное исследование течений и теплообмена в индукционной плазме высокочастотного плазмотрона // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том VII-1. Часть 2. М.: Янус-К. 2008. С. 220–234.

11. Колесников А.Ф., Якушин М.И. Об определении эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов по тепловым потокам к поверхности, обтекаемой диссоциированным воздухом // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 3. С. 44–60.
12. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Влияние закрутки потока на дозвуковую струю воздуха в ВЧ-плазматроне ВГУ-4 // Изв. РАН. МЖГ. 2024. № 5. С. 119–127.

## References

1. Kolesnikov A. F., Shchelokov S. L., Analysis of the simulation conditions of the aerodynamic heating in subsonic high-enthalpy air jets from the VGU-4 HF plasmatron, *Fluid Dynamics*, 2021, vol. 56, no. 2, pp. 236–241. <https://doi.org/10.1134/S0015462821020063>
2. Anderson L. A., Sheldahl R. E., Experiments with two flow-swallowing enthalpy probes in high-energy supersonic streams, *AIAA Journal*, 1971, vol. 9, no. 9, pp. 1804–1810.
3. Kolesnikov A. F., Gordeev A. N., Vasil'evskii S. A., Tepteeva E. S., The effect of the geometry of the discharge channel in a high-frequency plasmatron on heat transfer in high-enthalpy subsonic air jets, *High Temperature*, 2019, vol. 57, no. 4, pp. 469–476. <https://doi.org/10.1134/S0018151X19040114>
4. Schouler M., Prévereaud Y., Mieussens L., IXV post-flight reconstruction and analysis of the aerothermodynamic measurements along the rarefied portion of the reentry trajectory, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 178, no. 121582. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121582>
5. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., New regimes of plasma flows and heat transfer in the IPG-4 plasmatron, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2008, vol. 7 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/453/>
6. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., High-frequency induction plasmatrons of the VGU series, *Actual problems in mechanics: Physical and chemical mechanics of liquids and gases*. Moscow: Nauka publ., 2010, pp. 151–177 [in Russian].
7. ASTM E422-05(2016). *Standard Test Method for Measuring Heat Flux Using a Water-Cooled Calorimeter*, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2016.
8. Polezhaev Yu. V., Yurevich F. B., *Heat protection*, Moscow, Energiya publ., 1976. 392 p. [In Russian]
9. *Physics and technics of low temperature plasma* / Dresvin S.V., Donskoi A.V., Goldfarb V.M., Klubnikin V.S. Moscow: Atomizdat publ., 1972 [in Russian].
10. Vasil'evskii S. A., Kolesnikov A. F., Numerical simulation of flow and heat transfer in the inductively coupled plasma of the HF-plasmatron, *Encyclopedia of low temperature plasma*. Series B, vol. VII-1, part 2. Moscow: Yanus-K publ. 2008, pp. 220–234 [in Russian].
11. Kolesnikov A. F., Yakushin M. I., On the determination of effective probabilities of heterogeneous recombination of atoms by heat flux to a surface from the dissociated air flow, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 1989, vol. 1, no. 3, pp. 44–60 [in Russian].
12. Vasil'evskii S.A., Kolesnikov A.F., Effect of flow swirling on the subsonic air jet in the VGU-4 HF plasmatron, *Fluid dynamics*, 2024, vol. 59, no. 5, pp. 1129–1136.

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2024 г.