

# Experimental Study of Heat Transfer to Metals and Quartz Surfaces in Underexpanded Dissociated Nitrogen Jets in RF-Plasmatron

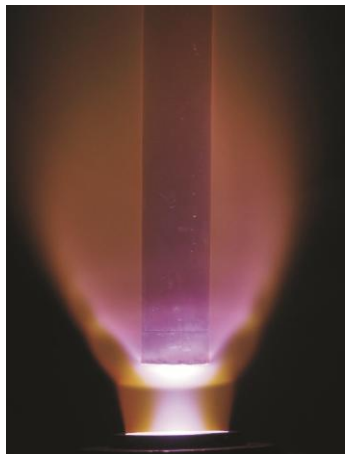
A.F. Kolesnikov, A.N. Gordeev, A.N. Konov, I.V. Lukomskii, V.M. Mysova, Yu.K. Rulev

*Institute for problems in mechanics Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 119526*  
koles@ipmnet.ru

## Abstract

Stagnation pressures in underexpanded high-enthalpy nitrogen jets, produced by the RF-plasmatron IPG-4 at gas mass flow rates 2.4 and 3.6 g/s, RF-generator powers 45 and 64 kW, and ground pressure 10.4 hPa are measured. At the same test conditions stagnation point heat fluxes to water-cooled copper, stainless steel and quartz are measured using a 20-mm diameter cylindrical model with a flat nose. Catalytic heating effect with respect to N atoms recombination is demonstrated, and qualitative catalytic scale for above materials is established. Complex shock wave structures in flow field around cylindrical model with a flat nose are registered.

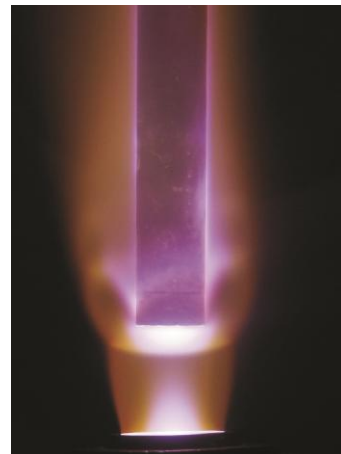
Keywords: RF-plasmatron, dissociated nitrogen, underexpanded jet, heat transfer, catalytic recombination.



Z = 20 mm



Z = 25 mm



Z = 30 mm

Flow fields around 20-mm diameter cylindrical water-cooled model in underexpanded high-enthalpy nitrogen jets in RF-plasmatron IPG-4 with 30-mm diameter sonic nozzle at generator power 45 kW, nitrogen mass flow rate 2.4 g/s, ground pressure 10.4 hPa.

**It is found that in underexpanded dissociated nitrogen jets cold copper and stainless steel are high-catalytic materials, and quartz is low catalytic one. Maximum of measured heat flux to copper reaches 800 W/cm<sup>2</sup>.**

УДК 533.6.011.8

# Экспериментальное исследование теплообмена поверхностей металлов и кварца с недорасширенными струями диссоциированного азота в ВЧ-плазмотроне

**А.Ф. Колесников, А.Н. Гордеев, А.Н. Конов, И.В. Лукомский,  
В.М. Мысова, Ю.К. Рулев**

*Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН),  
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского 101, к. 1  
[koles@ipmnet.ru](mailto:koles@ipmnet.ru)*

## Аннотация

На индукционном плазмотроне ВГУ–4 при расходах газа 2.4; 3.6 г/с и мощностях ВЧ–генератора 45; 64 кВт измерены давления торможения в недорасширенных сверхзвуковых струях высокоэнтальпийного азота при давлении в барокамере 10.4 гПа. В этих же режимах измерены тепловые потоки к поверхности меди, нержавеющей стали и кварца в критической точке водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоским торцом диаметром 20 мм. Продемонстрирован эффект влияния каталитичности поверхности по отношению к рекомбинации атомов азота на тепловой поток, установлена качественная шкала каталитичности исследованных материалов. Зарегистрированы сложные ударно-волновые структуры, возникающие при обтекании недорасширенной сверхзвуковой струей высокоэнтальпийного азота водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоским торцом.

Ключевые слова: ВЧ–плазмотрон, диссоциированный азот, недорасширенная струя, теплообмен, каталитическая рекомбинация.

## 1. Введение

При входе в атмосферу Земли со скоростями меньше 9 км/с основная доля аэродинамического нагрева поверхности спускаемого аппарата обусловлена конвективными тепловыми потоками. Расчетная величина теплового потока зависит от полноты и точности физической модели поля течения в ударном и пограничном слоях и модели взаимодействия высокоэнтальпийного потока газа с поверхностью, используемых при численном моделировании. Количественное описание и понимание роли неравновесных процессов, протекающих в потоке и на поверхности, также важно для интерпретации данных экспериментов, полученных в высокоэнтальпийных установках, и переноса этих данных на условия входа в атмосферу [1–4].

В этой связи важное значение имеют расчетные модели колебательной релаксации молекул  $N_2$ , неравновесных реакций диссоциации молекул  $N_2$  и рекомбинации атомов  $N$  в газовой фазе. Для валидации этих моделей используют экспериментальные данные, полученные в ударных трубах (течения со сжатием газа в ударных волнах) и в соплах (течения с расширением газа) [5].

Новые возможности исследований влияний кинетики газофазных и поверхностных реакций на теплообмен высокоэнтальпийных потоков газов с поверхностью и валидации компьютерных кодов предоставляют эксперименты в недорасширенных струях диссоции-

рованного азота на индукционных ВЧ–плазмотронах. При обтекании моделей такими сложными по газодинамической структуре струями имеются области с расширением потока за звуковым соплом и области со сжатием газа в ударной волне перед моделью.

Теплообмен различных поверхностей с дозвуковыми высокоэнтальпийными струями азота экспериментально и численно исследовался в [6]. Целью данной работы является получение экспериментальных данных по теплообмену на водоохлаждаемых моделях в сверхзвуковых недорасширенных струях частично диссоциированного азота на 100–киловаттном ВЧ–плазмотроне ВГУ–4. Для ряда рабочих параметров плазмотрона выполнены измерения давления торможения вдоль оси потока с помощью трубки Пито. Измерены тепловые потоки к водоохлаждаемым поверхностям меди, нержавеющей стали и кварца в точке торможения на цилиндрической модели с плоским торцом диаметром 20 мм вдоль оси струи. Экспериментально продемонстрирован эффект влияния каталитичности поверхности по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов азота на конвективный тепловой поток. Получены экспериментальные данные по ударно-волновым структурам, возникающим при обтекании водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоским торцом недорасширенной сверхзвуковой струей высокоэнтальпийного азота. Данная работа является продолжением исследований теплообмена недорасширенных струй диссоциированных молекулярных газов с охлаждаемыми поверхностями металлов и кварца [7–10].

## **2. Экспериментальная установка**

Эксперименты проводились в ИПМех РАН на высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ–4 мощностью ~100 кВт [11]. Плазмотрон ВГУ–4 используется для исследований теплообмена высокоэнтальпийных потоков газов с поверхностью, изучения взаимодействия потоков плазмы с высокотемпературными материалами в условиях, моделирующих термохимическое воздействие плазмы ударного слоя на участки поверхности спускаемого аппарата, а также для отборочных испытаний теплозащитных материалов. Внешний вид установки ВГУ–4 показан на рис.1, а основные технические характеристики приведены в табл. 1.

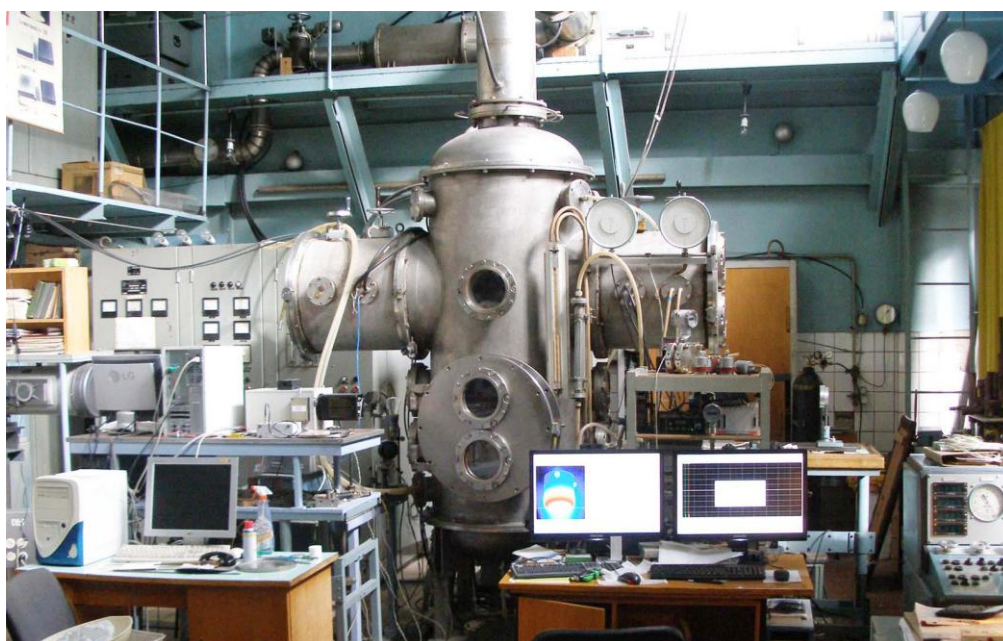


Рис.1. Внешний вид 100–киловаттного плазмотрона ВГУ–4

Таблица 1.

**Основные технические характеристики плазмотрона ВГУ–4**

|  |  |
|--|--|
| Мощность по анодному питанию, кВт        | 12–85  |
| Частота, МГц                             | 1.76   |
| Давление в барокамере, гПа               | 10–1000  |
| Расход воздуха, г/с                      | 2-6  |
| Длина разрядного канала, мм              | 400  |
| Внутренний диаметр разрядного канала, мм | 80   |
| Рабочие газы                             | Воздух, азот, аргон, углекислый газ и их смеси |
| Режимы работы                            | дозвуковой, сверхзвуковой                      |

Эксперименты проводились в недорасширенных струях высокоэнтальпийного азота, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходного сечения 30 и 40 мм. Давление в затопленном пространстве составляло 10.4 гПа. Давление торможения измерялось трубкой Пито с плоским торцом диаметром 20 мм и приёмным отверстием диаметром 12 мм. В измерениях тепловых потоков использовались стационарные водоохлаждаемые калориметры, изготовленные из меди, нержавеющей стали и кварца. Калориметры устанавливались в носовой части водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоским торцом диаметром 20 мм, выполненной из меди.

Фотография недорасширенной сверхзвуковой струи высокоэнтальпийного азота, истекающей из водоохлаждаемого звукового сопла диаметром 40 мм при мощности анодного питания 45 кВт, расходе азота 2.4 г/с и давлении в барокамере 10.4 гПа приведена на рис.2.

**3. Измерения давления торможения и тепловых потоков**

Теплообмен водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоским носком диаметром 20 мм с высокоэнтальпийной недорасширенной струей азота при давлении в барокамере 10.4 гПа экспериментально исследован в четырех режимах – при  $N_{ap} = 45; 64$  кВт и  $G = 2.4; 3.6$  г/с при диаметрах выходного сечения водоохлаждаемых конических сопел 30 и 40 мм. Давление торможения и тепловые потоки к охлаждаемым поверхностям меди, нержавеющей стали и кварца измерялись вдоль оси струи с шагом 5 мм. Давление торможения измерялось водоохлаждаемой трубкой Пито, имеющей форму цилиндра с плоским торцом диаметром 20 мм. Тепловые потоки в критической точке модели измерялись стационарными проточными калориметрами, изготовленными из монолитных кусков меди, нержавеющей стали и кварца.

На рис.3 приведены давления торможения вдоль оси струи для двух режимов истечения диссоциированного азота из сопла с диаметром выходного сечения 30 мм:  $N_{ap} = 45$  кВт;  $G = 2.4$  г/с и  $N_{ap} = 64$  кВт;  $G = 3.6$  г/с.

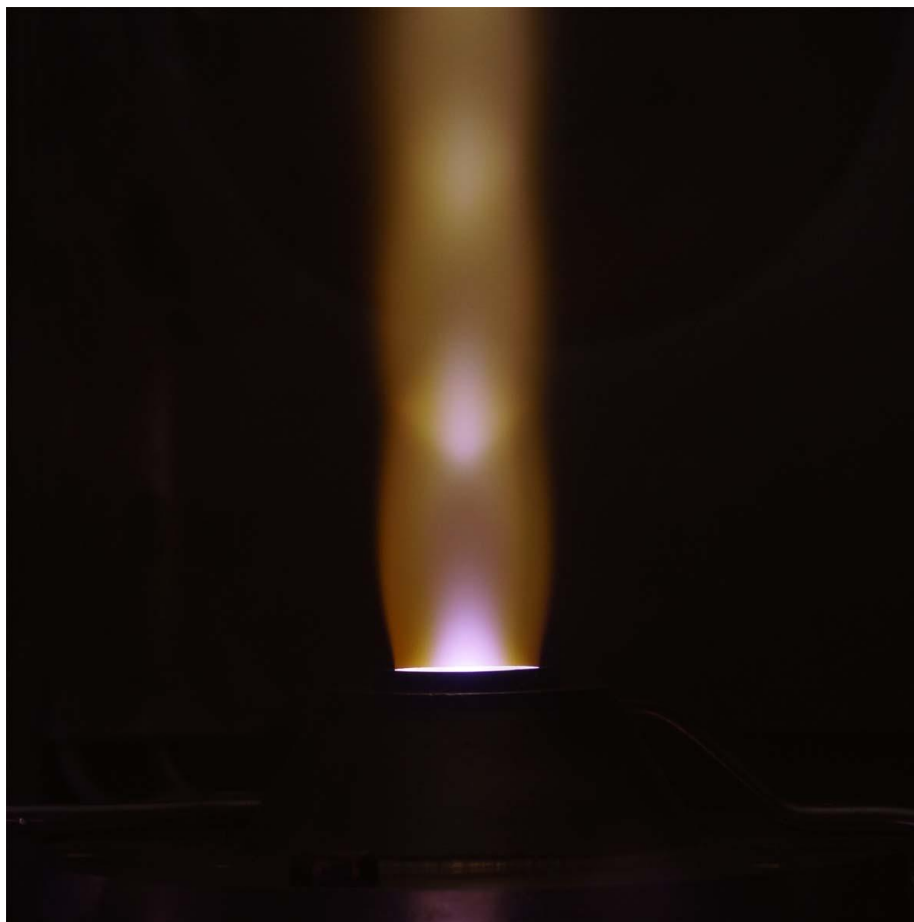


Рис.2. Фотография высокоэнтальпийной сверхзвуковой недорасширенной струи азота, истекающей из водоохлаждаемого звукового сопла диаметром выходного сечения 40 мм при мощности анодного питания 45 кВт, расходе азота 2.4 г/с и давлении в барокамере 10.4 гПа

На рис. 4 и 5 приведены данные измерений тепловых потоков к поверхностям меди, нержавеющей стали и кварца в критической точке модели в зависимости от расстояния до звукового сопла диаметром 30 мм для «стандартного» ( $N_{ap} = 45$  кВт;  $G = 2.4$  г/с) и «сильного» ( $N_{ap} = 64$  кВт;  $G = 3.6$  г/с) режимов. Тепловые потоки к меди и нержавеющей стали близки и монотонно убывают в первой сверхзвуковой зоне недорасширенной струи. В этой области струи уменьшение с расстоянием от среза сопла тепловых потоков к поверхности кварца существенно более плавное. В «стандартном» режиме максимальное значение теплового потока к поверхности меди достигается на расстоянии 20 мм от среза сопла и составляет  $540$  Вт/см<sup>2</sup>. В «сильном» режиме тепловой поток к меди в этом же положении модели достигает  $800$  Вт/см<sup>2</sup>. Тепловые потоки к нержавеющей стали немного ниже тепловых потоков к меди. Минимальные тепловые потоки реализуются на поверхности кварца.

На рис. 6 приведены данные измерений тепловых потоков к поверхностям меди, нержавеющей стали и кварца в критической точке модели в зависимости от расстояния до звукового сопла диаметром 40 мм для «сильного» ( $N_{ap} = 64$  кВт,  $G = 3.6$  г/с) режима. В «сильном» режиме тепловой поток к меди на расстоянии 20 мм от среза сопла достигает  $550$  Вт/см<sup>2</sup>. Тепловые потоки к меди и нержавеющей стали близки. Минимальные тепловые потоки реализуются на поверхности кварца.

Представленные экспериментальные данные по тепловым потокам наглядно демонстрируют тепловой эффект гетерогенной рекомбинации атомов азота: тепловой поток к поверхности меди более чем в 3 раза превышает тепловой поток к поверхности кварца. В шкале каталитичности материалов нержавеющая сталь занимает близкое положение к меди.

Настоящие результаты для меди и кварца качественно согласуются с данными, полученными ранее в дозвуковых потоках диссоциированного азота [6].

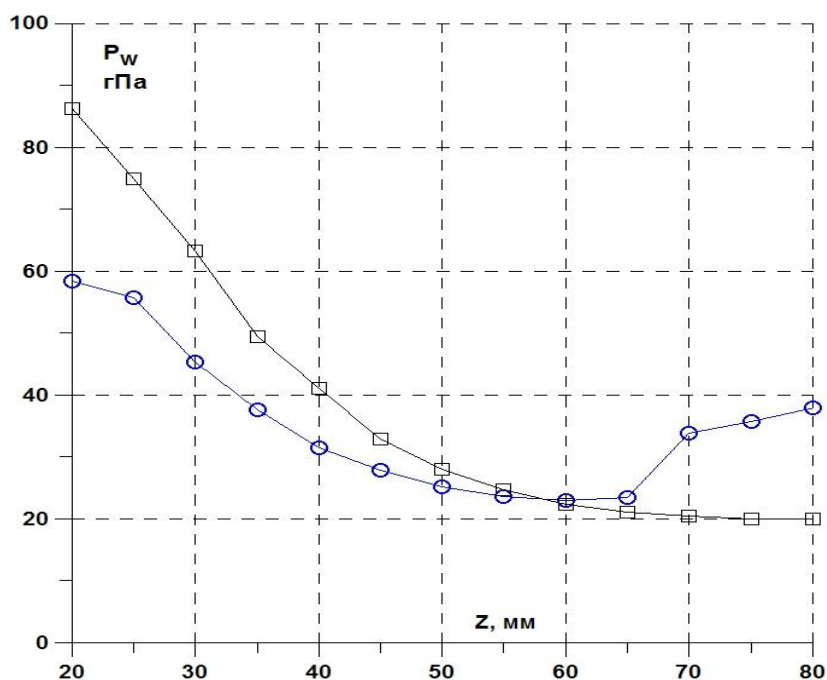


Рис. 3. Давление торможения как функция расстояния от среза сопла плазматрона для двух режимов работы ВГУ–4 с коническим соплом с диаметром выходного сечения 30 мм:  $N_{ар} = 45$  кВт;  $G = 2.4$  г/с (синяя кривая с кружками), и  $N_{ар} = 64$  кВт;  $G = 3.6$  г/с (черная кривая с квадратами)

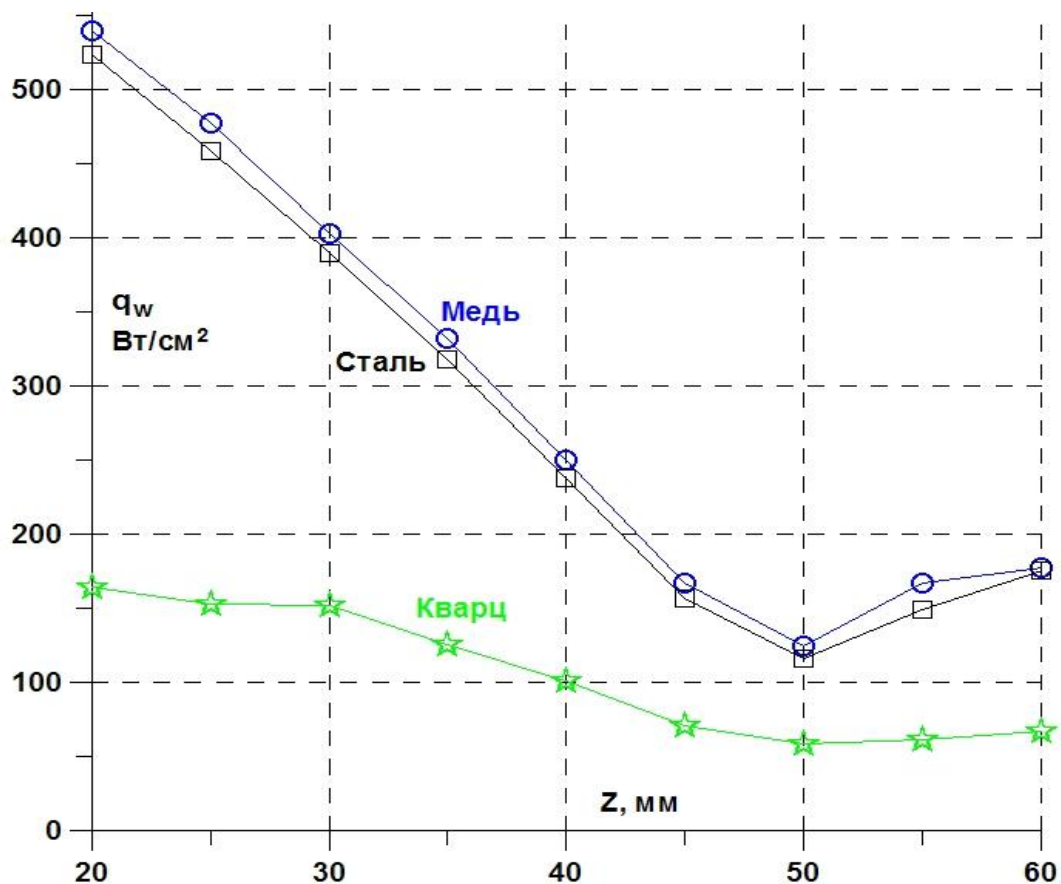


Рис. 4. Тепловой поток к различным датчикам как функция расстояния  $Z$  от среза канала. Измерения проводились в сверхзвуковом потоке чистого азота для режима работы ВГУ–4:  $N_{ар} = 45$  кВт;  $G = 2.4$  г/с;  $D = 30$  мм

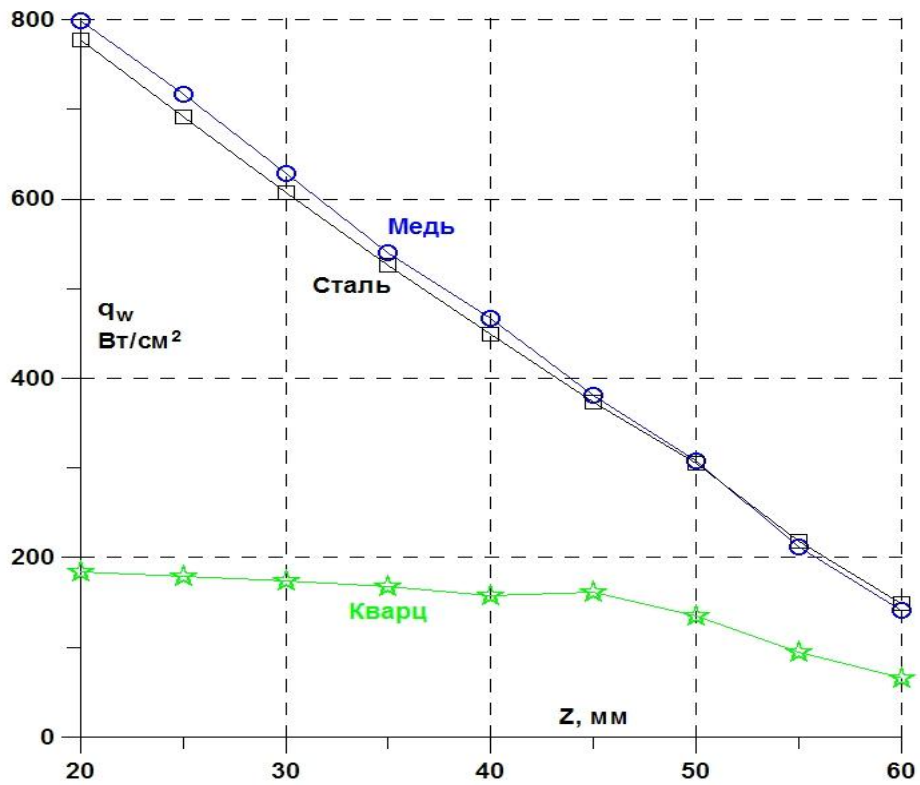


Рис. 5. Тепловой поток к различным датчикам как функция расстояния  $Z$  от среза канала. Измерения проводились в сверхзвуковом потоке чистого азота для режима работы ВГУ-4:  $N_{ap}=64$  кВт;  $G=3.6$  г/с;  $D=30$  мм

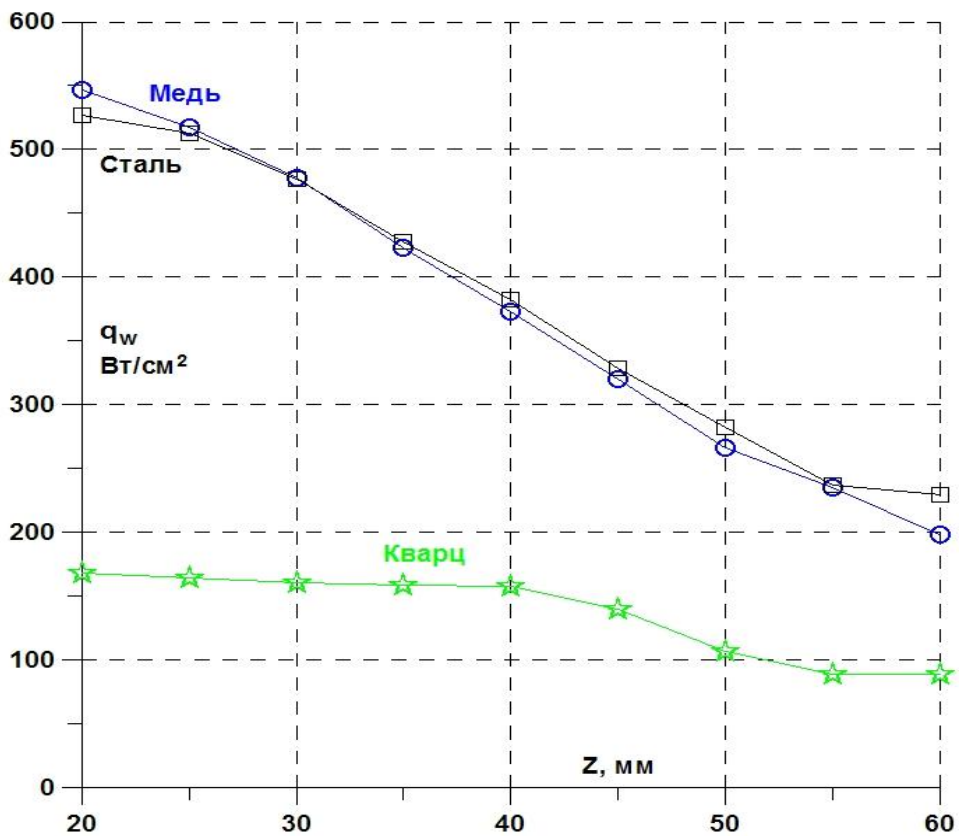


Рис. 6. Тепловой поток к различным датчикам как функция расстояния  $Z$  от среза канала. Измерения проводились в сверхзвуковом потоке чистого азота для режима работы ВГУ-4:  $N_{ap}=64$  кВт;  $G=3.6$  г/с;  $D=40$  мм

В данных экспериментах было отмечено существенное влияние состояния медной охлаждаемой поверхности на тепловой поток к ней. Приведенные здесь данные соответствуют максимальным значениям тепловых потоков, зарегистрированным на медной полированной очищенной поверхности меди, которая не подвергалась перед экспериментом тренировке в потоках диссоциированного воздуха или азота.

#### **4. Ударно-волновые структуры при обтекании цилиндрической модели с плоским торцом высокоэнтальпийной недорасширенной струей азота**

Ударно-волновые структуры, возникающие при обтекании водоохлаждаемой цилиндрической модели недорасширенными сверхзвуковыми струями высокоэнтальпийных газов, являются тестовыми объектами для проверки качества численного моделирования. Действительно, при обтекании цилиндрических водоохлаждаемых моделей недорасширенными высокоэнтальпийными струями воздуха, углекислого газа и азота визуально наблюдаются сложные ударно-волновые структуры, которые весьма сильно изменяются при изменении расстояния между соплом и моделью. В [7] были совмещены половинки чёрно-белых цифровых фотографий картины обтекания водоохлаждаемой модели недорасширенной струей высокоэнтальпийного воздуха (слева от оси симметрии струи и модели) и выполненного в виде непрерывных градаций серого расчётного поля плотности (справа от оси симметрии струи и модели), что позволило убедиться в высоком качестве численного расчёта, обеспечившего хорошее согласие экспериментальных и расчётных данных по положению и форме скачков уплотнения.

На рис. 7 показаны фотографии ударно-волновых структур, возникающих при обтекании цилиндрической водоохлаждаемой модели с плоским носком сверхзвуковой недорасширенной струей высокоэнтальпийного азота. Модель расположена на разных расстояниях от среза конического сопла диаметром 30 мм.



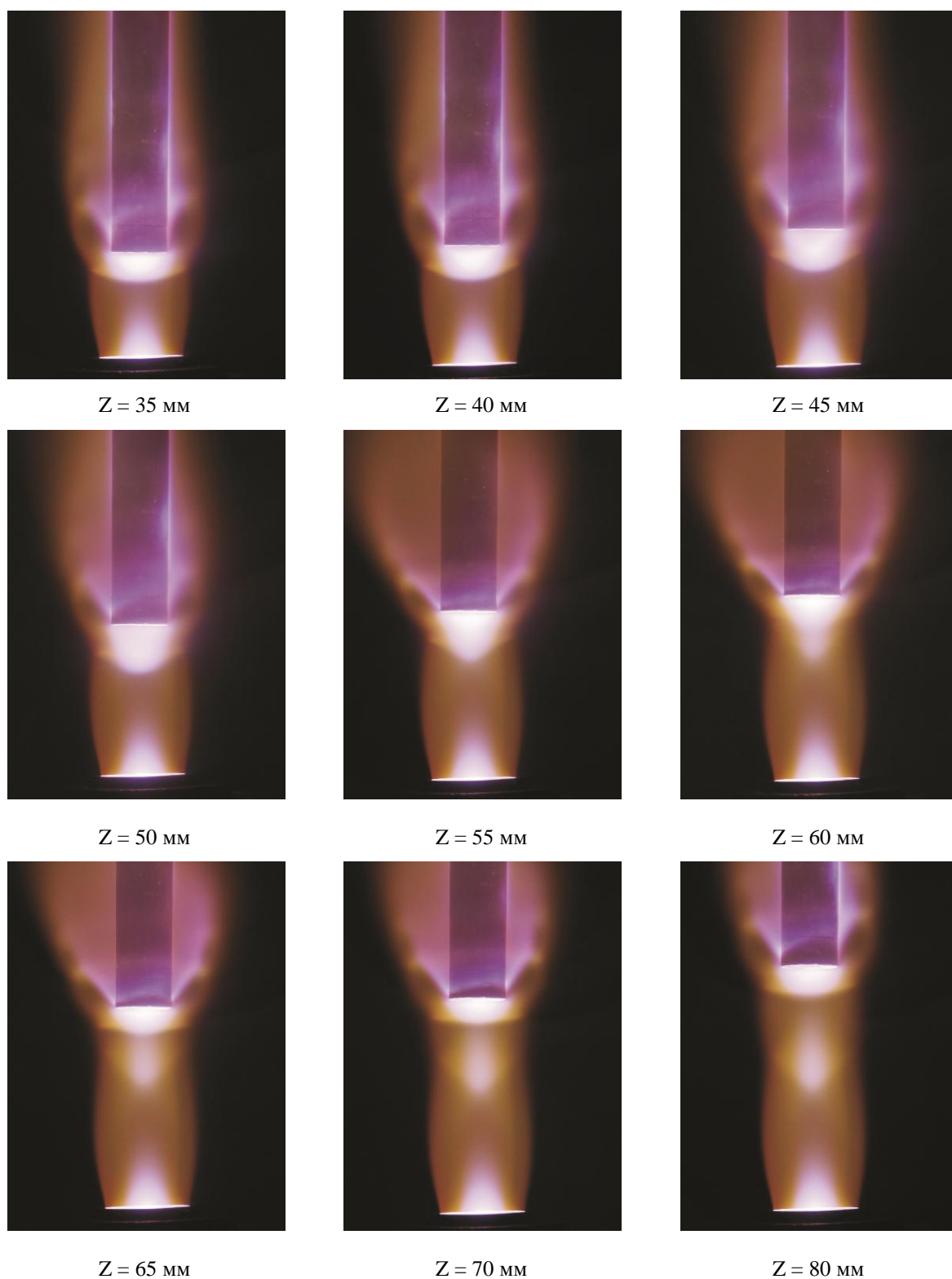


Рис.7. Ударно-волновые структуры, возникающие при обтекании водоохлаждаемой модели с плоским торцом диаметром 20 мм сверхзвуковой недорасширенной струёй высокоэнтальпийного азота, истекающей из конического звукового сопла диаметром 30 мм. Мощность ВЧ-генератора — 45 кВт; расход азота — 2.4 г/с; давление в затопленном пространстве — 10.4 гПа

## 5. Заключение

На индукционном плазмотроне ВГУ–4 при различных расходах газа (2.4 и 3.6 г/с) и мощностях ВЧ–генератора по анодному питанию (45 и 64 кВт) проведены эксперименты по измерению давления торможения в высокоэнтальпийных недорасширенных сверхзвуковых струях азота, истекающих из звукового сопла диаметром 30 мм при давлении в барокамере 10.4 гПа.

Измерены тепловые потоки к водоохлаждаемым поверхностям меди, нержавеющей стали и кварца в критической точке цилиндрической модели с плоским торцом диаметром 20 мм, обтекаемой высокоэнтальпийными недорасширенными сверхзвуковыми струями азота, истекающими из водоохлаждаемых звуковых сопел с диаметрами выходного сечения 30 и 40 мм при давлении в барокамере 10.4 гПа в «стандартном» и «сильном» режимах работы плазмотрона ВГУ–4.

Экспериментально продемонстрирован эффект влияния каталитической рекомбинации атомов азота на тепловой поток к охлаждаемой поверхности. Установлена качественная каталитическая шкала материалов по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов N: медь ~ нержавеющая сталь > кварц.

Зарегистрированы сложные ударно-волновые структуры, возникающие при обтекании высокоэнтальпийными недорасширенными сверхзвуковыми струями азота водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоским торцом.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14–01–00738.

## Литература

1. Kolesnikov A.F. The Aerothermodynamic Simulation in Sub- and Supersonic High-Enthalpy Jets: Experiment and Theory. // Proc. 2nd European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles. ESA Publication Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-367, 1995. pp. 583-590.
2. Колесников А.Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 1. С. 172–180.
3. Kolesnikov A.F. The Concept of Local Simulation for Stagnation Point Heat Transfer in Hypersonic Flows: Application and Validation. AIAA Paper 2000-2515, 2000.
4. Колесников А.Ф. Условия локального подобия термохимического взаимодействия высокоэнтальпийных потоков газов с неразрушаемой поверхностью // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 1. С. 118–125.
5. Park C., Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics, Wiley, New York, 1990.
6. Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Якушин М.И. Определение эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов в условиях влияния на тепловой поток газофазных реакций // Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29. № 3. С. 521–529.
7. Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Сахаров В.И. Течение и теплообмен в сверхзвуковых струях воздушной плазмы: эксперимент на ВЧ–плазмотроне и численное моделирование. Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем». АФМ–2007. Сборник научных трудов. Москва, ИПМех РАН, 2007. С. 23–28.
8. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И. Течение и теплообмен в недорасширенных струях индукционного плазмотрона // Известия РАН, Механика жидкости и газа. 2011, № 4. Изд-во «Наука». Москва. С. 130 – 142.
9. Колесников А. Ф., Гордеев А. Н., Сахаров В. И. Теплообмен в недорасширенных неравновесных струях углекислого газа: эксперимент на индукционном плазмотроне и экстраполяция на условия входа в атмосферу Марса//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 4. 18с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/238/>

10. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И. Течение и теплообмен в недорасширенных неравновесных струях углекислого газа: эксперимент и численное моделирование // Теплофизика высоких температур. 2015, Т. 53, № 2, С. 284–290.
11. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Индукционные плазмотроны серии ВГУ. В сб.: Актуальные проблемы механики. Физико-химическая механика жидкостей и газов. М., Наука, 2010. С.151–177.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2015 г.